

# NEVAC

BLAD

jaargang 51 / nummer 2

## Verslag NEVAC-dag 2013

De relatie tussen de elektrische en optische eigenschappen van plasma-gedeponerd zinkoxide

Het voordeel van UHV in een helium-ionenmicroscop

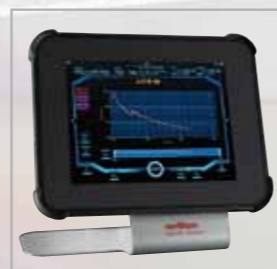


NEDERLANDSE  
VACUÛMVERENIGING



# PHOENIX L500i

## Evolutionary High Speed Leak Detection



Intuitive operation via the iPad touch panel which is installed either on the leak detector or allows for mobile operation.

### Setting a new standard in short-cycle leak testing

The new PHOENIX L500i helium leak detector represents an innovative and pioneering solution for leak testing of all kinds of components. In serial test of large batches or in individual tests, the PHOENIX L500i improves the speed and reliability of your testing operation, providing immediate cost savings. Designed for production environment, numerous features make the PHOENIX L500i easy and comfortable to use while its robustness will reduce the cost of ownership and ensure highest uptime. Apart from an attractive visual appearance and numerous reporting options, it excels through accurate high-speed leak detection, reproducibility, and an absolutely new user experience.

**The PHOENIX L500i opens up new dimensions of productivity and reliability**

Oerlikon Leybold Vacuum Nederland B.V.  
Proostwetering 24 N  
3543 AE Utrecht  
T +31 30 24 26 330  
F +31 30 24 26 331  
sales.vacuum.ut@oerlikon.com  
[www.oerlikon.com/leyboldvacuum](http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum)

innovation  
has a name  
**oerlikon**  
leybold vacuum

### Colofon

#### Redactie

Claud Biemans, eindredacteur  
Bas Dielissen  
Hans van Eck, hoofdredacteur  
Ad Ettema  
Erwin Kessels  
Fred Schenkel

#### Web-adres

[www.nevac.nl](http://www.nevac.nl)

#### Redactiesecretariaat

NEVAC  
Delftechpark 26  
2628 XH Delft  
[redactie@nevac.nl](mailto:redactie@nevac.nl)

#### Abonnementenadministratie

NEVAC  
Delftechpark 26  
2628 XH Delft

#### Abonnementen

Binnenland € 25,- per jaar  
Buitenland € 100,- per jaar

#### Advertentie-exploitatie

NEVAC  
Delftechpark 26  
2628 XH Delft

#### Grafische vormgeving

Claud Biemans  
[www.frontlinie.nl](http://www.frontlinie.nl)

#### Verschijningsdijstippen 2013

April  
Juli  
December

Kopij inzenden naar het redactiesecretariaat. Lidmaatschap opgeven bij de ledenadministratie. Abonnementen opgeven bij abonnementenadministratie.

#### Vergoeding kopij

Artikelen in het Nederlands over vacuümtechniek en haar toepassingen in de wetenschap en industrie worden door de redactie zeer op prijs gesteld. Voor studenten en promovendi is een vergoeding van € 250,- per gepubliceerd artikel beschikbaar.

ISSN 0169-9431

### Bij de omslag



Op de voorpagina staat een close-up van de Ultra High Vacuum Low Temperature Scanning Tunneling Microscope in het lab van Mark Golden, die te bezichtigen was tijdens de NEVAC-dag, 23 april 2013 in Amsterdam.

FOTO'S MONICA SCHOKKENBROEK

- 5 Van de redactie *Hans van Eck*
- 6 Het voordeel van UHV in een helium-ionenmicroscop *V. Veligura, G. Hlawacek, R. van Gastel, H.J.W. Zandvliet, en B. Poelsema*
- 10 NEVAC-dag 2013: Alle uithoeken van het vacuüm belicht *Claud Biemans*
- 14 De relatie tussen de elektrische en optische eigenschappen van plasma-gedeponerd zinkoxide *Bas van de Loo, Harm Knoops, Mikhail Ponomarev, Erwin Kessels, Adriana Creatore*
- 20 Aart Kleijn gekozen tot Fellow van de American Vacuum Society
- 21 NEVAC-prijs 2014
- 22 Bedrijfsprofiel: Ceratec Technical Ceramics BV
- 23 Excursie Parijs, 9-13 september
- 23 Agenda

De sluitingsdatum van kopij voor het derde nummer van het NEVAC-blad 2013 is 15 oktober 2013



## Vacuum Solutions from a single Source

Pfeiffer Vacuum stands for innovative and custom vacuum solutions worldwide, technological perfection, competent advice and reliable service. We are the only supplier of vacuum technology that provides a complete product portfolio:

- Pumps for vacuum generation up to  $10^{-13}$  mbar
- Vacuum measurement and analysis equipment
- Leak detectors and leak testing systems
- System technology and contamination management solutions
- Chambers and components

Are you looking for a perfect vacuum solution? Please contact us:

**Pfeiffer Vacuum Benelux B.V.**  
T +31 345 478 400 · F +31 345 531 076  
office@pfeiffer-vacuum.nl

www.pfeiffer-vacuum.com



### Verenigingsgegevens

#### Ereleden

L.G.J.M. Hassink, Stibbe 23,  
2421 MR Nieuwkoop  
G. Ikking, Artemisstraat 34,  
2624 ZN Delft  
† Prof.dr. J. Kistemaker  
† Ir. J.H. Makkink  
Th. Mulder, Ambachtsheerelaan 60,  
3481 GM Harmelen  
Dr.ir. E.P.Th.M. Suurmeijer, Elzenlaan 11,  
9321 GL Peize  
Prof.dr. J. v.d. Veen, Schubertlaan 8,  
1411 HZ Naarden  
Dr.ir. J. Verhoeven, Kon. Julianaweg 23,  
3628 BN Kockengen

#### Bestuur

Dr. A.F. Otte, voorzitter  
Prof.dr.ir. W.M.M. Kessels, vice-voorzitter  
J.W.M. van Kessel, secretaris  
Dr. A.R.H.F. Ettema, penningmeester

#### Verenigingssecretariaat

Jan W.M. van Kessel  
jwmvankessel@gmail.com of  
secretaris@nevac.nl

#### Adres ledenadministratie

p/a Dr. A.R.H.F. Ettema  
NEVAC, Delftechpark 26,  
2628 XH Delft, The Netherlands  
Telefoon: +31 15 2600406  
Fax: +31 15 2600405  
e-mail: penningmeester@nevac.nl

#### Inflichtingen over opleidingen en examens

Dr.ir. E.P.Th.M. Suurmeijer  
Elzenlaan 11, 9321 GL Peize  
Telefoon: 050-5032556  
e-mail: eptm.suurmeijer@kpnplanet.nl

#### Penningmeester NEVAC

Postgiro 1851529, o.v.v.:  
Penningmeester NEVAC,  
t.a.v. Dr. A.R.H.F. Ettema,  
Delftechpark 26,  
2628 XH Delft

#### Contributies

Contributie € 20,- per jaar  
Studenten/promovendi € 5,- per jaar  
Bedrijfsleden € 150,- per jaar

## Van de redactie

Hierbij verschijnt alweer de tweede uitgave van het *NEVAC blad* nieuwe stijl, jaargang 51. De redactie heeft wederom haar best gedaan om voldoende interessant leesvoer te verzamelen voor de komende zomervakantie. Dat kunnen we natuurlijk alleen bereiken indien u voldoende kopij blijft aanbieden. De redactie is de auteurs van de twee wetenschappelijke artikelen dan ook erkentelijk voor het insturen van bijdragen van zeer hoog niveau.

Het eerste artikel van de hand van Vasilisa Veligura gaat over de voordelen van een beter vacuüm in een helium-ionenmicroscop, die niet gering blijken te zijn. De Physics of Interfaces and Nanomaterials-groep van de Universiteit Twente waar deze promovenda werkzaam is, is erin geslaagd het basisvacuüm van de microscop zo'n drie ordes van grootte te verbeteren. In deze verbeterde vacuümomgeving wordt de koolstofopbouw geremd, wat tot betere prestaties van de microscop heeft geleid.

Het artikel van Bas van de Loo, promovendus in de Plasma & Materials Processing-groep van de Technische Universiteit Eindhoven, behandelt de relatie tussen de elektrische en optische eigenschappen van plasma-gedeponeerd zinkoxide. De depositie vindt plaats in een vacuümopstelling waarbij de plasma-bron relatief veel gas inlaat. Om toch een redelijk lage druk te bereiken worden rootspompen met een flinke pompsnelheid gebruikt. Eén van de toepassingen van zinkoxide is als toplaag in zonnecellen. Dit onderzoek levert dan ook een bijdrage in de zoektocht naar dunne, efficiënte zonnecellen.

Verder in dit nummer, naast de gebruikelijke rubrieken, een uitgebreid verslag van de NEVAC-dag 2013 (met veel foto's!). Rest mij niets anders dan u veel leesplezier en een fijne, hopelijk zonnige, zomer toe te wensen.

Hans van Eck  
Hoofdredacteur NEVAC blad





# Het voordeel van UHV in een helium-ionenmicroscop

Helium-ionenmicroscopie (HIM) is een nieuwe microscopietechniek met een grote oppervlaktegevoeligheid, een hoge ruimtelijke resolutie en een aantal verschillende contrastmechanismes. Daarnaast kan HIM gebruikt worden voor de modificatie van oppervlakken en voor nanofabricage. Een optimale toepassing van de techniek wordt echter mogelijk belemmerd door een ontoereikend vacuüm. Dit hangt samen met een koolstoflaag die onder invloed van de ionenbundel wordt afgezet. Om de effecten van een verbeterd vacuüm te onderzoeken hebben we een standaard HIM op verschillende punten aangepast. We laten zien hoe de sterk verbeterde vacuümcondities het mogelijk maken diverse preparaten, waaronder bijvoorbeeld Au(111) en zelf-ordenende moleculaire lagen, af te beelden zonder de ongewenste opbouw van koolstof ten gevolge van de ionenbundel. We laten tevens zien hoe gereflecteerd helium gebruikt kan worden voor het afbeelden van moleculaire monolagen en van structuren die vele nanometers onder het oppervlak liggen.

V. Veligura, G. Hlawacek, R. van Gastel, H.J.W. Zandvliet, en B. Poelsema

Physics of Interfaces and Nanomaterials, MESA+ Institute for Nanotechnology, Universiteit Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede

Helium-ionenmicroscopie (HIM) is een nieuwe techniek voor het karakteriseren en modificeren van materialen [1,2]. HIM lijkt veel op de vaak toegepaste rasterelektronenmicroscopie. In plaats van elektronen maakt HIM gebruik van een smalle, primaire bundel van snelle heliumionen voor het vormen van een afbeelding. De Orion Plus HIM van Carl Zeiss Nano Technology Systems bezit een extreem hoog oplossend vermogen bij het afbeelden van oppervlakken, als gebruik wordt gemaakt van de door de heliumbundel gegenereerde secundaire elektronen (SE). Naast secundaire elektronen kunnen ook gereflecteerde heliumdeeltjes gebruikt worden voor het vormen van een afbeelding. Voor het afbeelden van niet-geleidende oppervlakken in HIM kan bovendien ladingcompensatie worden toegepast. Hierbij wordt de tijdens het afbeelden opgebouwde oppervlaktelading verwijderd door periodiek het afgebeelde gebied ook te belichten met een laag-energetische elektronenbundel, die het aanbrengen van een ge-

leidende coating overbodig maakt [3]. Ondanks de duidelijke voordelen van de techniek, hebben de conventionele (dus niet UHV-) helium-ionenmicroscopen last van een probleem dat typisch speelt in een systeem dat gebruikmaakt van een bundel van snelle geladen deeltjes: de opbouw van een laag koolstof ten gevolge van de slechte vacuümomstandigheden [4,5]. Om dit ongewenste effect, dat voor He-ionen sterker is dan voor elektronen, te ondervangen en de prestaties van de techniek verder te verbeteren hebben wij de standaardconfiguratie van een HIM ingrijpend gewijzigd met als doel het vacuüm substantieel te verbeteren. De hieronder genoemde maatregelen hebben het basisvacuüm met zo'n drie ordes van grootte verbeterd [6]. In dit artikel laten we een aantal voorbeelden zien die gemeten zijn met het in figuur 1 weergegeven apparaat, en die het effect van het verbeterde vacuüm illustreren.

## Basisprincipe van HIM

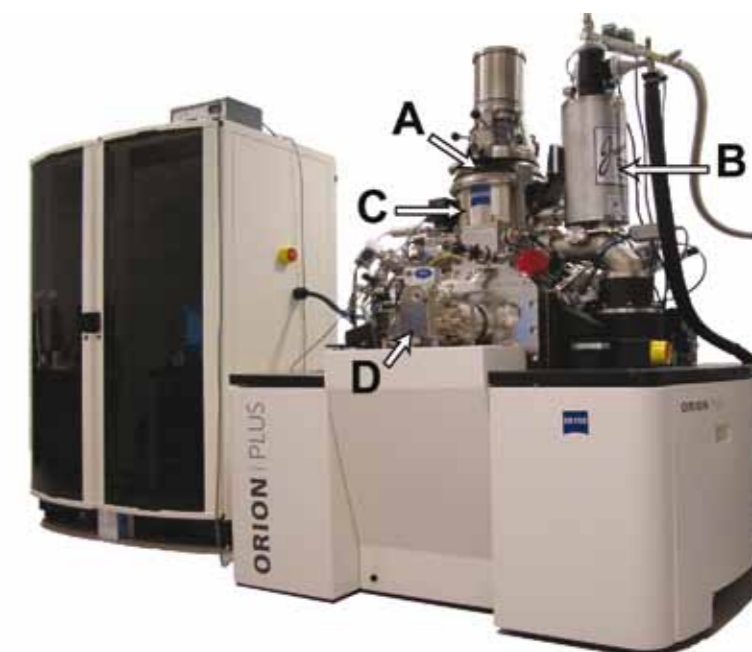
Het belangrijkste element van een HIM

is de *Atomic Level Ion Source* (ALIS). Dit is een atomair scherpe naald waarop een positieve hoogspanning wordt gezet en die wordt gekoeld met vloeibaar stikstof onder de aanwezigheid van heliumgas [7]. Door middel van een speciale procedure wordt een zogeheten "trimeer" gevormd aan het uiteinde van de naald – een configuratie bestaande uit drie atomen. De veldgradiënt die tot stand wordt gebracht door de aangelegde potentiaal is het hoogst bij de atomen aan het uiteinde van de naald, waar het trimeer zich bevindt. Het heliumgas wordt daar het meest effectief geïoniseerd en versneld. Het resultaat is een circa 35 keV He<sup>+</sup> bundel, die wordt gedomineerd door bijdragen van de drie atomen van het trimeer. Door het plaatsen van een diafragma kan een uiterst smalle bundel geselecteerd worden, die bestaat uit bijdragen afkomstig van één enkel atoom van het trimeer. Omdat het heliumion, vergeleken met een elektron, een hoge massa heeft, is zijn De Broglie-golflengte klein en is verbreding van de bundel door diffractie

verwaarloosbaar. De heliumbundel die ontstaat uit de bron kan daarmee als een sub-nanometersonde gebruikt worden voor het bestuderen van preparaten.

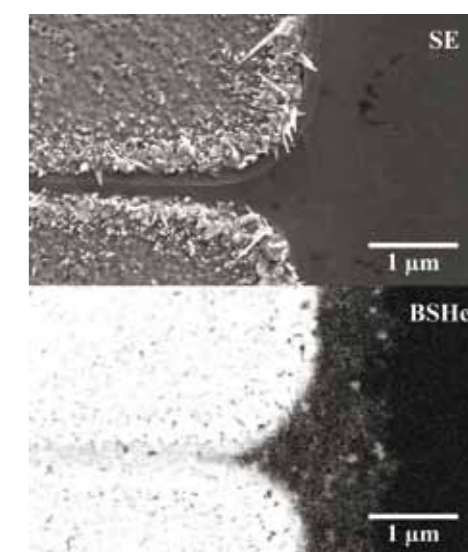
De inslag van de heliumionen op een preparaat leidt tot de generatie van secundaire elektronen, gereflecteerde heliumdeeltjes en, in sommige gevallen, fotonen. In het materiaal ondergaan de energetische heliumdeeltjes een aantal elastische en inelastische botsingen met de elektronen en de kernen van het preparaat. Een botsing met een licht elektron leidt typisch nauwelijks tot verstrooiing van de heliumdeeltjes vanwege de geringe impulsoverdracht. Botsingen met de atoomkernen doen dat wel, maar die vinden echter effectief pas dieper in het materiaal plaats als de invallende heliumionen al fors wat energie hebben verloren. Het nettoresultaat hiervan is dat in de buurt van het oppervlak van het preparaat de vorm van de bundel behouden wordt en extreem smal blijft. Secundaire elektronen, die gevormd worden in de buurt van het oppervlak, kunnen enkel aan het preparaat ontsnappen als ze in de bovenste paar nanometer van het wisselwerkingsvolume gevormd worden. De laterale resolutie van een HIM is daarom bij het gebruik van secundaire elektronen extreem hoog (circa 0,25 nm) [8]. Het beeld wordt opgebouwd door het meten van secundaire elektronen met een Everhardt-Thornley (ET) -detector en het geeft hoofdzakelijk informatie over de topografie van het preparaat, eventueel verweven met kwalitatieve materiaal-informatie zoals bijvoorbeeld variaties in samenstelling.

Afbeeldingen die opgebouwd worden door de detectie van gereflecteerde heliumdeeltjes bevatten daarentegen veel meer informatie over de samenstelling van het preparaat en geven veel minder informatie over de topografie [3]. Een microkanaalplaat die geplaatst is tussen het preparaat en het objectief van het instrument verzamelt signaal van gereflecteerd helium. De botsingsdoorsnede voor reflectie van helium aan een atoom



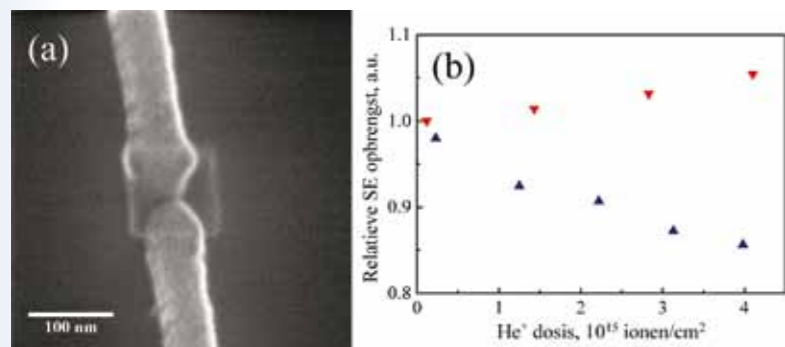
**Figuur 1** Foto van het vacuümsysteem van de gemodificeerde helium-ionenmicroscop. Links in de foto is de aansturingselectronica afgebeeld. Het aangepaste vacuümsysteem is te zien in de rechterhelft van de foto. De bron (A) bevindt zich bovenin de kolom en wordt gekoeld met behulp van een vast dewarvat voor stikstof (B). De bundel wordt via de ionenoptica (C) geprojecteerd op de preparaten. De preparaatkamer van de opstelling wordt voorzien van samples middels de aangepaste laadsluis (D). Alle drie de vacuümkamers van het instrument, waarin zich van boven naar onder respectievelijk de bron, de ionenoptica, en de preparaten bevinden, hebben alle een vacuümdruk in het UHV-bereik.

met atoomnummer  $Z$ , schaalte ongeveer met  $Z^2$ . Zware materialen veroorzaken daardoor een relatief hoge stroom aan gereflecteerd helium. Die gereflecteerde heliumdeeltjes kunnen tevens een traject in het preparaat afgelegd hebben van vele tientallen nanometers. Dat maakt het afbeelden mogelijk van delen van het preparaat die verborgen liggen onder het oppervlak. Figuur 2 toont een voorbeeld hiervan. De afbeeldingen zijn respectievelijk gemaakt met behulp van secundaire elektronen en gereflecteerd helium, van Pd/PdSi<sub>2</sub> elektroden die aangebracht zijn op een substraat [9] bestaande uit een gelaagde structuur van SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub> met diktes van 1121/182/114 nanometer. Tweehonderd nanometer dikke Pd elektroden zijn gedeponeerd op het Si substraat en zijn later verwarmd. Tijdens het verwarmen vindt er diffusie plaats van het Pd in het Si, wat leidt tot de vorming van een PdSi<sub>2</sub> legering. Het Pd mengt niet met het SiO<sub>2</sub> en het eindresultaat is een PdSi<sub>2</sub> contact dat gevormd wordt

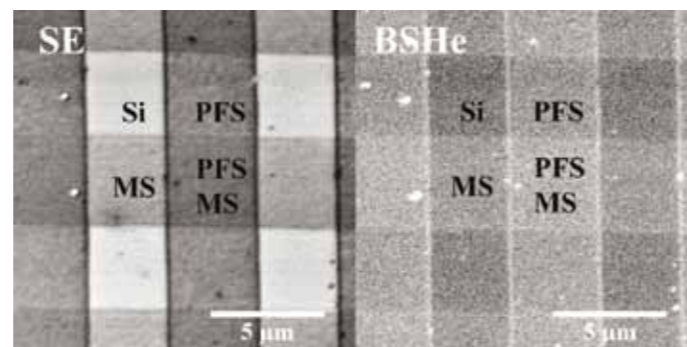


**Figuur 2** HIM-afbeeldingen van Pd elektrodes op een Si substraat, gevormd met secundaire elektronen (SE, boven) en gereflecteerd helium (onder). Het gat tussen de elektroden is 0,3 µm breed. Het SE-plaatje geeft voornamelijk topografische informatie, terwijl in het gereflecteerd-heliumplaatje informatie over de samenstelling onder het oppervlak zichtbaar is. Beeldbereik: 5 x 3 µm, energie van de primaire bundel: 30,5 keV.





**Figuur 3** (a) HIM SE-plateetje van Au elektroden met daartussen een kloof van een paar nm. Het vierkantje dat zichtbaar is in het midden van het plaatje is een koolstofilm die is gevormd tijdens het meten van een plaatje met hoge resolutie in dat gebied. Beeldveld: 2  $\mu\text{m}$ , primaire heliumenergie: 28,5 keV. (b) De verandering in SE-opbrengst als functie van de heliumdosis voor een UHV (rood) en niet-UHV (blauw) -systeem.



**Figuur 4** HIM SE- en gereflecteerd-heliumplaatjes van dunne organische lagen (MS en PFS) die een kruispatroon vormen op Si(001). PFS-strepen lopen verticaal en MS-strepen horizontaal. Het beeldveld is 15  $\mu\text{m}$  en de primaire heliumenergie is 15 keV.

onder het oppervlak. De aanwezigheid van het PdSi<sub>2</sub> is evident in het beeld dat opgebouwd is met gereflecteerd helium, maar niet zichtbaar in het beeld gevormd met secundaire elektronen.

Een andere vorm van contrast in HIM is het gevolg van *channeling* [10]. Als een ionenbundel een preparaat binnendringt langs één van de kristallografische hoofd-richtingen kan die veel dieper doordringen in het preparaat. De ionen die door zo'n kanaal in het kristal reizen, hebben een veel kleinere kans verstrooid te worden dan ionen die onder een willekeurige andere hoek op het kristal invallen. Dit gegeven leidt tot variaties in het aantal secundaire elektronen dat gegenereerd wordt, waarbij een kristal in SE-plateetjes typisch een lager signaal zal geven als de bundel invalt langs een hoofdkristalrichting. Immers, de secundaire elektronen die dieper in het kristal gemaakt worden, hebben een kleine kans naar buiten te komen.

#### De UHV-kamer

Een gefocuseerde ionenbundel kan zeer effectief koolwaterstoffen kraken die aanwezig zijn in het restvacuüm van het instrument, welke vervolgens aan het oppervlak van het preparaat hechten. Figuur 3(a) laat een SE-plateetje zien van twee goud elektroden die een paar nanometer van elkaar verwijderd zijn, nadat al eerder een afbeelding gemaakt was van het gat tussen de elektroden. Een

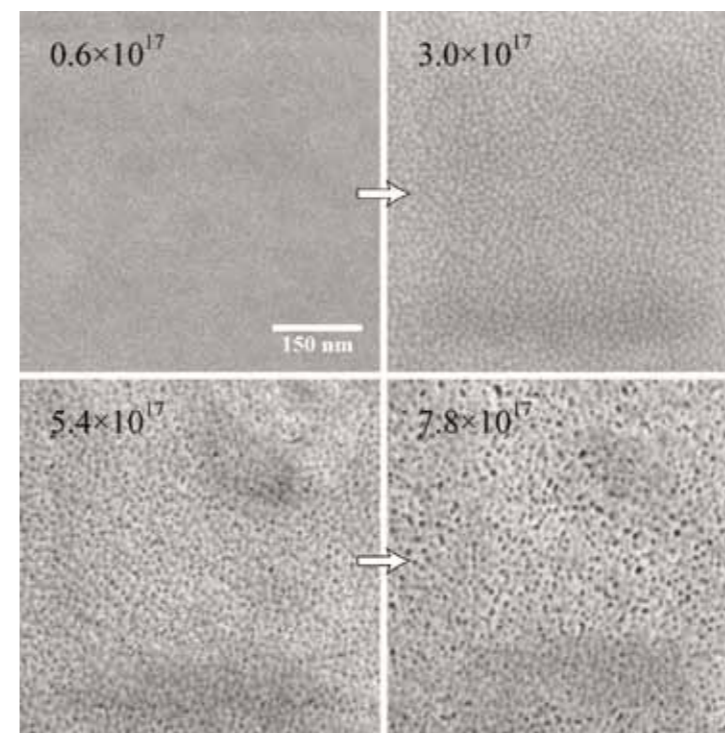
koolstoflaag heeft zich opgebouwd in het afgebeelde gebied, wat een verandering veroorzaakt van het contrast en de laterale resolutie.

Om dit probleem op te lossen zijn een aantal ingrijpende wijzigingen van de standaard Orion Plus-configuratie doorgevoerd met als doel het vacuüm wezenlijk te verbeteren [6]. De belangrijkste ingrepen zijn gedaan aan de hoofdkamer van het vacuümsysteem. In plaats van met nikkel bedekt staal is die kamer nu gemaakt van roestvrij staal. Alle niet-UHV-compatibele onderdelen zijn uit het systeem verwijderd en vervangen door UHV-compatibele equivalenten. Waar nodig worden smeermiddelen met een zeer lage dampdruk toegepast. Alle vacuümafichtingen zijn vervangen door conflatflenzen met koperen pakkingen, met uitzondering van de deur, die met (differentieel gepompte) dubbele O-ringen is afgedicht. De beschikbare pomp-snelheid in het systeem is verhoogd door het plaatsen van een 5000 l/s Ti sublimatiepomp achterin de hoofdkamer van het systeem. Daarnaast zijn halogeenlampen toegepast voor het effectief uitstoken van het vacuümsysteem en is de laadsluit van het systeem aangepast, zodat handmatig preparaten ingebracht kunnen worden met een magneetstok, die tijdens het meten verwijderd kan worden. Al deze aanpassingen leiden tot een einddruk in het systeem van de orde van 10<sup>-10</sup> mbar tijdens het verrichten van experimenten.

Het effect dat het verbeterde vacuüm heeft op het aantal secundaire elektronen dat gegenereerd wordt als functie van blootstelling aan heliumionen is weergegeven in figuur 3(b). Een polykristallijn Au preparaat, dat vooraf met een O<sub>2</sub> plasma is gereinigd, is blootgesteld aan de heliumbundel in een UHV- en in een niet-UHV-opstelling onder verder identieke omstandigheden. In het niet-UHV-apparaat is een duidelijke vermindering van het signaal waarneembaar vanwege de geleidelijke opbouw van een koolstoflaag op het preparaat. Onder UHV-omstandigheden is een kleine stijging waarneembaar, die wordt toegeschreven aan een lichte verruwing van het oppervlak onder invloed van de heliumbundel. De opbouw van koolstof is niet langer zichtbaar.

#### Voordelen van UHV

Voor een aantal experimenten is de UHV-omgeving zelfs essentieel om voor de prestaties van de HIM het onderste uit de kan te halen. We laten hier een aantal voorbeelden zien. In figuur 4 zijn een aantal afbeeldingen te zien, opgebouwd met respectievelijk SE en gereflecteerd helium, van dunne organische lagen op een Si(001) substraat [11]. De 4  $\mu\text{m}$  brede loodrechte strepen zijn zelfgeordende monolagen van (3-mercaptopropyl) trimethoxysilaan (MS, C<sub>6</sub>H<sub>16</sub>O<sub>3</sub>SSi) en triethoxy(1H,1H,2H,2H-tridecafluorooctyl)silaan (PFS, C<sub>14</sub>H<sub>19</sub>F<sub>13</sub>O<sub>3</sub>Si). De



**Figuur 5** HIM SE-plateetjes van een identiek gebied op Au(111). De plaatjes laten de verandering van het oppervlak zien onder invloed van een 15 keV heliumbundel. De heliumdosis per afbeelding was  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . De getallen in de linkerbovenhoek geven de totale dosis in ionen per cm<sup>2</sup> aan.

dikte van de lagen komt overeen met de lengte van de moleculen, respectievelijk 7 en 11 Å voor MS en PFS. Het contrast in het linkerdeel van figuur 4 wordt veroorzaakt door het verschil in uittrepotentiaal. Het hoge contrast dat zichtbaar is in het plaatje dat opgebouwd is uit gereflecteerde heliumdeeltjes is opmerkelijk, omdat in dit geval de moleculaire film praktisch transparant is voor heliumionen en de dominante bijdrage aan de intensiteit van het substraat komt. Het contrast schrijven we toe aan het *channeling*-effect van het substraat. Enerzijds ziet het deel van het Si(001) oppervlak dat niet met de moleculaire monolaag bedekt is, en waarop de bundel loodrecht invalt, er relatief donker uit. Anderzijds verstrooit de organische laag de invallende bundel zodanig dat de effectieve hoek van inval van de ionen op het Si substraat verandert, zodat het *channeling*-effect langs de [001]-richting van het substraat (deels) wordt onderdrukt. Het effect is het duidelijkst zichtbaar in gebieden waar beide moleculaire lagen over elkaar liggen. We merken

op, dat een laag koolstof een soortgelijk *dechanneling*-effect zou veroorzaken en dientengevolge het in figuur 4 blootgelegde contrast volledig zou laten onder-sneeuwen. Een ander voorbeeld van een experiment waarvoor een UHV-omgeving noodzakelijk is, is de verandering van een oppervlak onder invloed van de heliumbundel. Au(111) is herhaaldelijk blootgesteld aan de heliumbundel met een dosis van  $6 \times 10^{16}$  ionen per cm<sup>2</sup>. Figuur 5 toont de veranderingen van de topografie van het oppervlak als functie van totale dosis. De UHV-omgeving maakt hoge-resolutie-afbeeldingen mogelijk van de nanostructuren die zich aan het oppervlak ontwikkelen, zonder dat die structuren bedekt worden door een laag koolstof. Het periodieke patroon dat zich ontwikkelt met de toename van de (extreme) flux is duidelijk zichtbaar en uiteindelijk wordt een poreuze structuur gevormd.

#### Conclusies

Helium-ionenmicroscopie is zeer geschikt voor het afbeelden van de topo-

grafie van ultradunne films en van structuren die onder het oppervlak liggen. Het hardnekkige en soms desastreuze probleem van de vorming van koolstof-films onder invloed van de heliumbundel is met succes aangepakt door een ingrijpende aanpassing van de standaardconfiguratie van een Orion Plus HIM. Een UHV-omgeving is ook nodig voor het nauwkeurig karakteriseren van oppervlakken (substraten) die lang belicht worden door de bundel.

#### Dankwoord

We zijn Erik Faber, Rob Wolters, Cora Salm, Jurriaan Schmitz en Antony George erkentelijk voor het voorbereiden en het beschikbaar stellen van de verschillende preparaten. Dit onderzoek is medegefinancierd door Technologiestichting STW, die onderdeel is van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) en deels gefinancierd wordt door het Ministerie van Economische Zaken.

#### Referenties

- 1 J. Mogran, J. Notte, R. Hill, and B. Ward, *Microsc. Today*, **14**, 24-31, 2006.
- 2 D.C. Bell, M.C. Lemme, L.A. Stern, J.R. Williams, and C.M. Marcus, *Nanotechnology*, **20**, 455301, 2009.
- 3 L. Scipioni, C.A. Sanford, J. Notte, B. Thompson, and S. McVey, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **27**, 3250, 2009.
- 4 D. Lau, A.E. Hughes, T.H. Muster, T.J. Davis, and A.M. Glenn, *Microsc. Microanal.*, **16**(1), 13-20, 2010.
- 5 A. Vldar and M. Postek, *Microscopy and Microanalysis*, **11**, 764-765, 2005.
- 6 R. van Gastel, L. Barriss, C. Sanford, G. Hlawacek, L. Scipioni, A. Merkle, D. Voci, C. Fenner, H. Zandvliet, and B. Poelsema, *Microsc. Microanal.*, **17**, 928-929, 2011.
- 7 B.W. Ward, J.A. Notte, and N.P. Economou, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **24**, 2871-2874, 2006.
- 8 D. Cohen-Tanugi and Y. Nan, *J. Appl. Phys.*, **104**, 063504, 2008.
- 9 R. van Gastel, G. Hlawacek, H.J.W. Zandvliet, and B. Poelsema, *Microelectron. Reliab.*, **52**, 2104-2109, 2012.
- 10 V. Veligura, G. Hlawacek, R. van Gastel, H.J.W. Zandvliet, and B. Poelsema, *Beilstein J. Nanotechnol.*, **3**, 501-506, 2012.
- 11 G. Hlawacek, V. Veligura, S. Lorbek, T.F. Mocking, A. George, R. van Gastel, H.J.W. Zandvliet, and B. Poelsema, *Beilstein J. Nanotechnol.*, **3**, 507-512, 2012.



# NEVAC-dag 2013: Alle uithoeken van het vacuüm belicht

Claud Biemans, foto's Monica Schokkenbroek

Op dinsdag 23 april kwamen meer dan 100 technici, onderzoekers, studenten en vertegenwoordigers van bedrijven bij elkaar tijdens de NEVAC-dag op het Science Park in Amsterdam. Mark Golden had met zijn team een afwisselend programma georganiseerd, met sprekers uit de wetenschappelijke en technische hoek, bedrijfspresentaties, posters van promovendi en gelegenheid tot het bezoeken van opstellingen in zijn lab.

Jan de Boer (UvA) opende de dag met een lezing waarin hij de zeer toepasselijke vraag stelde: Wat is vacuüm? In de loop der tijd heeft vacuüm zeer verschillende definities gehad. Macroscopisch gezien is vacuüm ruimte zonder materie. Maar die definitie was met de opkomst van de quantummechanica niet meer houdbaar. In het vacuüm ontstaan voor zeer korte tijd paren van deeltjes met hun antideeltje, die elkaar snel weer annihilieren. Toen sprak men over vacuüm als de toestand met de laagst mogelijke energie. Maar hoe meer de theorie zich ontwikkelde in de twintigste eeuw, des de minder begrepen we van het vacuüm. Uitgaande van de nulpuntsenergie van het vacuüm begrijpen we niet waarom de kosmologische constante zo klein is en het is niet bekend hoe het vacuüm in quantumchromodynamica wiskundig precies beschreven kan worden. Dit is een onderdeel van een van de zeven millennium vraagstukken, uitgeschreven door het Clay Mathematics Institute. Degene die de oplossing hiervoor weet, komt in aanmerking voor een prijs van 1 miljoen dollar.

## Vacuümkoffer

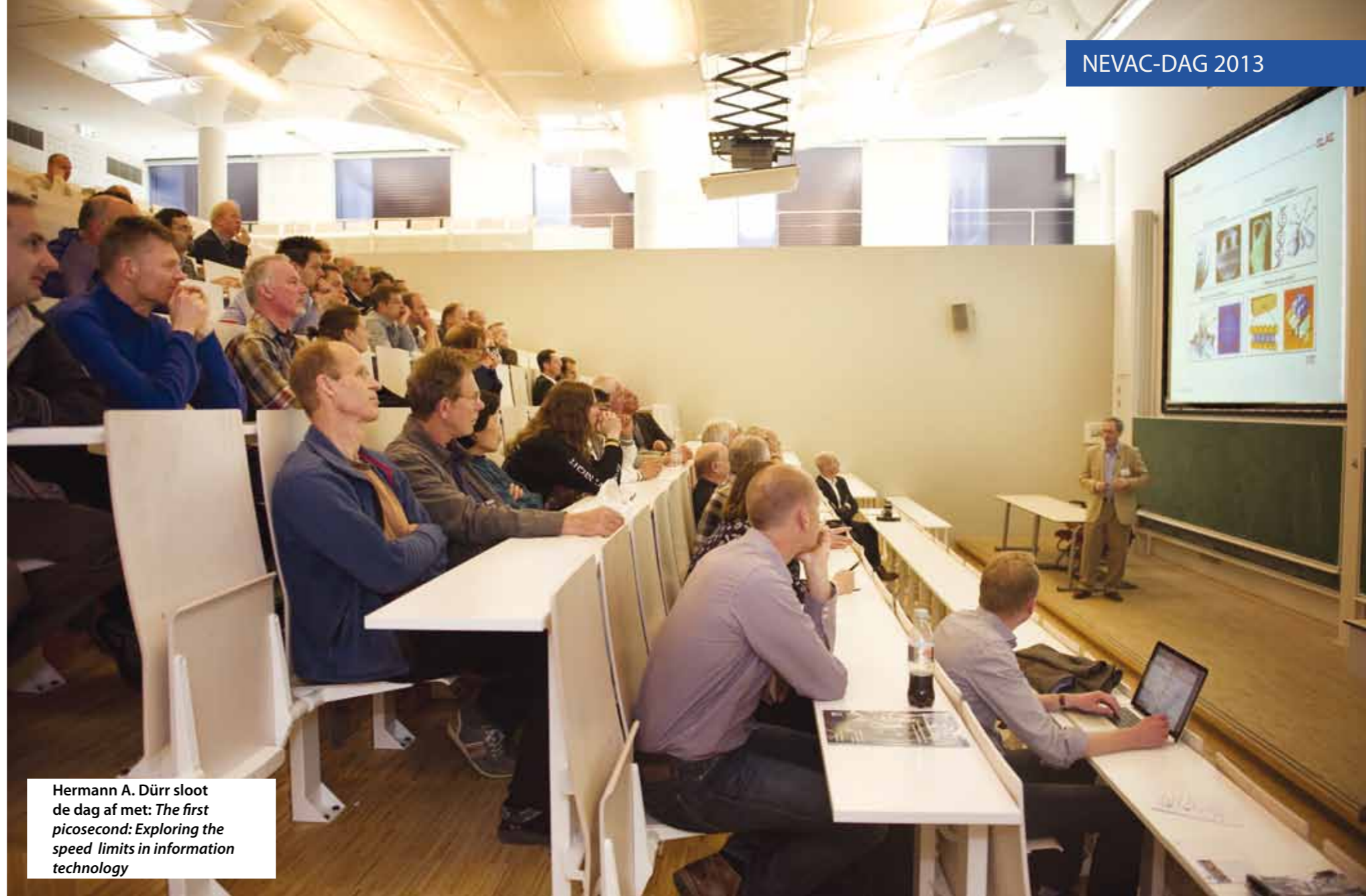
Gelukkig hebben we geen last van dit gebrek aan kennis voor moderne technische toepassingen van het vacuüm, zoals wel bleek uit de lezing van Gertjan Koster (UT) over het maken van materialen voor gebruik in brandstofcellen. In het MESA+ lab in Twente worden met behulp van gepulste laserdepositie op een substraat dunne films gevormd van verbindingen van twee metalen met zuurstof (perovskieten). Daarbovenop wordt een beschermende en geleidende bovenlaag van  $\text{SrCuO}_2$  gedeponerd. Een belangrijk onderdeel van dit werk is een door het MESA+ instituut ontworpen 'ultrahoogvacuüm-koffer', die gebruikt wordt om het materiaal onder hoog vacuüm te verplaatsen zodat het spectroscopisch bestudeerd kan worden met röntgenstraling.

Albert Polman (AMOLF) vertelde over de in zijn groep ontwikkelde techniek om nanofotonische materialen af te beelden met een resolutie van 10 tot 30 nm, veel kleiner dan de golflengte van zichtbaar licht. De techniek heet Angle-Resolved Cathodoluminescence Imaging Spectroscopy (ARCIS). Een elektronenbundel van 30 keV scant over het materiaal en aangeslagen toestanden zenden licht uit dat een maat is voor de lokale optische dichtheid. Het licht wordt opgevangen met een parabolische spiegel en naar een spectrometer gestuurd, die hoekopgelost verschillende golflengtes meet. Zo worden elektronenstructuren van nanomaterialen in beeld gebracht.

## Jonge mensen

Aan het eind van het ochtendprogramma ontvingen promovendus Bart Macco (TUE) en onderzoeker Marko Sturm (DIFFER) uit handen van Hans van Eck, hoofdredacteur van het *NEVAC blad*, de NEVAC-prijs 2013 voor het beste wetenschappelijke en technische artikel. Beide artikelen zijn in het vorige nummer opgenomen.

Tijdens de algemene ledenvergadering nam Erwin Kessels (TUE) afscheid als voorzitter en hij droeg het stokje over aan Sander Otte (TUD). Otte wil de komende tijd meer jonge mensen bij de vereniging betrekken. Het bestuur zoekt ook nog naar een student of promovendus die het bestuur van de NEVAC wil versterken. Erwin Kessels zal het komende jaar vicevoorzitter van de NEVAC zijn.



Hermann A. Dürr sloot de dag af met: *The first picosecond: Exploring the speed limits in information technology*

Tijdens de lunchpauze presenteerden verschillende promovendi posters over hun onderzoek en een tiental bedrijven lieten zien wat ze in huis hebben op het gebied van vacuümtechniek.

## Vernieuwend onderzoek

Tijdens het middagprogramma koos iets meer dan de helft van de aanwezigen voor drie lezingen met het accent op techniek. Jean-Luc Suchail (ESA) vertelde over vacuümkamers voor het testen van satellieten bij ESA. Andrea Cadoppi (SAES Getter S.p.A.) sprak over een nieuw ontwerp voor een ultrahoog vacuümpomp, NEX-Torr. En Eric Louis (DIFFER) besprak het proces van fundamenteel onderzoek aan de depositie van nanometers dikke lagen tot de toepassing hiervan voor het maken van optische onderdelen voor de

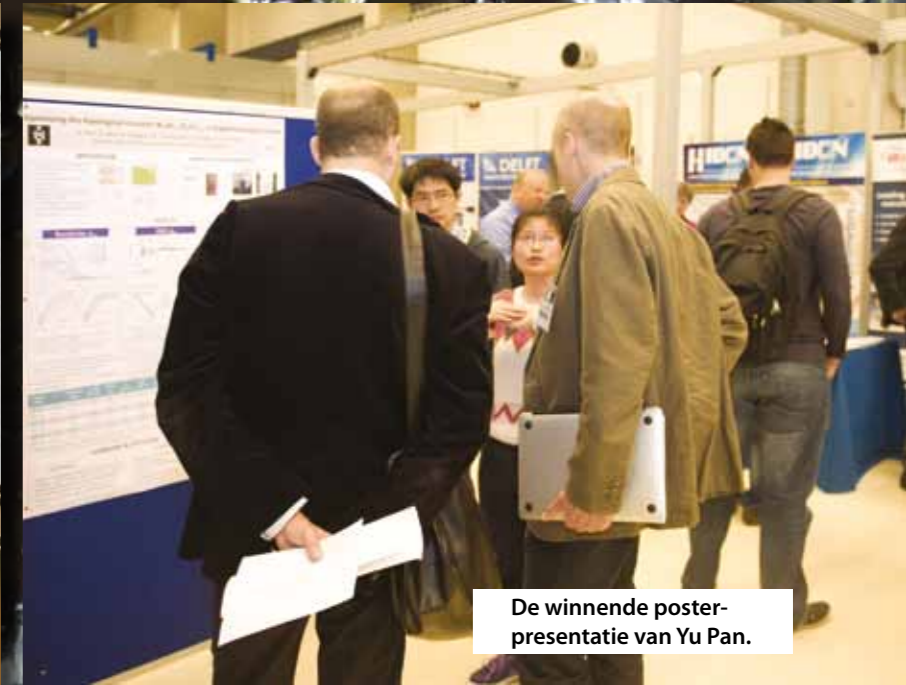
nieuwste EUV-lithografiemachines. In de andere zaal lag het accent op wetenschappelijke ontwikkelingen. Tjerk Oosterkamp (UL) ontwikkelt niet-destructieve tastmicroscopen die biologische materialen afbeelden met behulp van magnetische velden van kernspins. Robert Spreeuw (UvA) besprak verschillende scenario's voor het opslaan en manipuleren van quantuminformatie met behulp van loodatomen zwevend boven een magnetische film en Rydbergtoestanden. Sander Otte liet tenslotte voorbeelden zien van het verplaatsen van enkele atomen over een oppervlak in ultrahoog vacuüm met behulp van de tip van een STM.

Herman Dürr (SLAC National Accelerator Laboratory, VS) sloot in een gezamenlijke sessie de middag af met zijn zoek-

tocht naar de grenzen van de snelheid van informatieoverdracht. De toekomst ligt volgens hem in micro-femtosecondelasers in harddisks en geheugenmaterialen die in femtoseconden kunnen schakelen. Met gepulste röntgenstralen van de Linac vrije-elektronenlaser in Stanford worden daarvoor nu materialen op zeer kleine lengte en tijdschalen onderzocht.

Tijdens de afsluitende borrel ontving Yu Pan onder luid applaus de prijs voor de beste posterpresentatie, *Optimizing the topological insulator Bismuth-Antimony-Tellurium-Selenium, a magneto-transport study*, uit handen van Mark Golden. Dat was een mooie afsluiting van een zeer gevarieerde dag vol verhalen van vernieuwend onderzoek over alle technische en wetenschappelijke uithoeken van het vacuüm.





De winnende poster-presentatie van Yu Pan.



Het bestuur tijdens de ledenvergadering. V.l.n.r.: Ad Ettema, Erwin Kessels, Jan van Kessel, Sander Otte.



Jan de Boer.



Voorzitter Sander Otte.

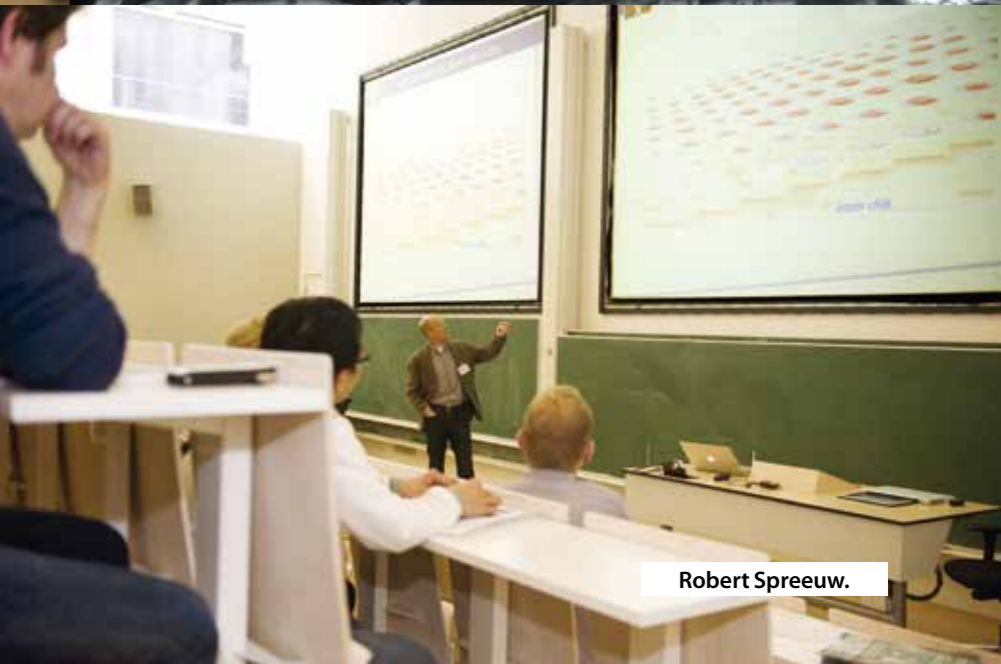
Vice-voorzitter Erwin Kessels.



Posters en bedrijfspresentaties.



Andrea Cadoppi.



Robert Spreeuw.



# De relatie tussen de elektrische en optische eigenschappen van plasma-gedeponerd zinkoxide

In dunne-film zonnecellen wordt zinkoxide gebruikt als toplaag, omdat dit materiaal tegelijk transparant en geleidend kan zijn. In dit werk zijn de elektrische eigenschappen van zinkoxide bepaald met een nieuwe optische methode. Op deze manier kregen we verbeterd inzicht in de elektrische geleiding van het zinkoxide en de relatie met de optische eigenschappen van het materiaal. Bovendien is het met dit model mogelijk de invloed van de twee belangrijkste verstrooiingsprocessen van vrije ladingen binnen het zinkoxide van elkaar te scheiden: de verstrooiing aan kristalgrenzen en de verstrooiing aan verontreinigingen.

**Bas van de Loo, Harm Knoops, Mikhail Ponomarev, Erwin Kessels, Adriana Creatore**

Faculteit Technische Natuurkunde, Plasma & Materials Processing groep,  
Technische Universiteit Eindhoven, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven.

Zinkoxide (ZnO) is een halfgeleider met een relatief grote bandgap van ongeveer 3,4 eV, wat het materiaal transparant maakt voor het zichtbare licht. Hoewel ZnO intrinsiek al vrije ladingen bevat, kan de elektrische geleiding van ZnO sterk worden vergroot door het doteren met bijvoorbeeld aluminiumatomen. Dit zogenoemde aluminium-gedoteerd zinkoxide combineert dus een hoge transparantie in het zichtbare gebied met een hoge elektrische geleiding.

Een van de toepassingen van gedoteerd ZnO is als toplaag in zonnecellen. Deze toplaag, vaak tussen de 80 en 400 nanometer dik, dient het inkomend licht door te laten naar de absorberende laag van de zonnecel. De functie van de ZnO laag zelf is het geleiden van de in de cel opgewekte stroom. Enkele typen zonnecellen die gebruikmaken van ZnO zijn nieuwe succesvolle concepten zoals de silicium-heterojunctiezonnecel, maar ook dunne-film zonnecellen zoals CIGS, en a-Si:H [1,2].

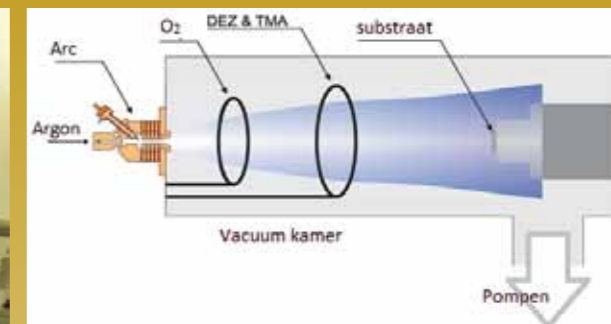
In dit werk zijn zowel aluminium-ge-

doteerde als ongedoteerde (intrinsieke) ZnO films vervaardigd door chemisch opdampen (engels: *chemical vapor deposition*, CVD) (zie kader). In dit proces reageren gassen tot een dunne, polykristallijne film op een substraat. Uniek aan het onderzoek op de Technische Universiteit Eindhoven is dat het opdampen geschiedt met behulp van een expanderend thermisch plasma (ETP), een techniek die inmiddels ook op industriële schaal wordt gebruikt voor de depositie van ZnO. Enkele belangrijke voordelen van het gebruik van het ETP voor de grootschalige productie van zonnecellen zijn dat door de reactiviteit van het plasma de depositietemperatuur laag gehouden kan worden (< 200 °C) en dat de depositiesnelheid relatief hoog is. Bovendien krijgt het zinkoxide dat op deze manier aangroeit van nature een ruw oppervlak, wat gunstig is voor het inkoppelen van licht in zonnecellen [3].

Om het zinkoxide verder te kunnen verbeteren en met zonnecellen een ho-

ger rendement te behalen, is diepgaand inzicht noodzakelijk in de fysische processen die de geleiding en transparantie bepalen. De transparantie van het zinkoxide kan in het infrarode gebied worden beperkt door reflectie en absorptie van licht door vrije ladingen in het zinkoxide. Juist door naar de mate van reflectie en absorptie te kijken, wordt inzicht verkregen in de geleidingseigenschappen van het zinkoxide. Het is bekend dat de geleiding van zinkoxidefilms met name wordt gelimiteerd door verstrooiing van vrije ladingen aan de kristalgrenzen en, binnen de kristallen, door verstrooiing van vrije ladingen aan “verontreinigingen”, zoals aangebracht door dotering [4]. In dit werk wordt daarom een nieuwe optische methode gepresenteerd, die de twee belangrijkste eigenschappen van ZnO verbindt: de geleiding en de transparantie. Bovendien wordt de bijdrage van de twee dominante verstrooiingsprocessen van elkaar gescheiden door deze optische methode te combineren met gelijkstroommetingen.

## Experimentele opstelling



**Figuur 1** Links: Foto van de plasmareactor zoals in gebruik op de TU/e voor de chemische-dampdepositie van zinkoxide. Rechts: Een schematische weergave van deze reactor, bestaande uit een cascadeboog (Arc), waarin argon wordt geïoniseerd dat vervolgens onder hoge druk expandeert in de vacuümkamer. In het plasma worden via twee ringen de precursoren zuurstof, diëthylzink (DEZ) en trimethylaluminium (TMA) geïnjecteerd.

De depositie van zowel gedoteerd als intrinsiek ZnO vindt plaats in een plasmareactor, zoals geïllustreerd in figuur 1. Het plasma wordt opgewekt door in een cascadeboog (engels: *cascaded arc*) argongas te ioniseren via een gelijkstroomontlading tussen drie kathodepunten en een anodeplaat. Dit argonplasma bevindt zich onder hoge druk (365 mbar) in de cascadeboog en expandeert in een vacuümkamer (2 mbar). In dit geëxpandeerde plasma worden vervolgens via twee injecteringen de precursor-moleculen zuurstof, diëthylzink (DEZ,  $C_2H_5)_2Zn$ ) en in geval van aluminium-gedoteerd ZnO ook trimethylaluminium (TMA,  $(CH_3)_3Al$ ) toegevoegd. De precursor-moleculen worden geïoniseerd via uitwisseling van lading met de argonionen [5], alvorens deze neerslaan op een substraat (kristallijn silicium of glas), wat op een constante temperatuur van 200 °C gehouden wordt. De substraten worden via een afzonderlijke vacuümkamer geladen om het va-

cuüm in de reactor niet tijdelijk te hoeven opheffen.

De gebruikte procescondities, zoals eerder in onze groep gevonden, geven een hoge kwaliteit zinkoxide [6]. De druk in de reactor tijdens depositie blijkt in sterke mate de kwaliteit en de groei van het zinkoxide te beïnvloeden [7]. Om een relatief lage druk van 2,0 mbar tijdens depositie te behouden, zijn drie vacuümpompen in serie geplaatst; twee rootspompen met een capaciteit van respectievelijk 2700 m<sup>3</sup>/h en 500 m<sup>3</sup>/h, en een draaischuifpomp (10 m<sup>3</sup>/h). Door de grootte van de opening van de reactor naar de pompen te controleren met een verstelbare klep, kan de druk in de reactor tijdens depositie worden bijgesteld tussen de 0,20 en 2,50 mbar. Tussen deposities door en in rust wordt de reactor afgepompt door een moleculaire turbopomp tot een druk van  $\sim 1,0 \cdot 10^{-5}$  mbar. De druk in de reactor wordt gemeten door zowel een Pirani-manometer als een (gas-onafhankelijke) capaciteitsmanometer.

### Optisch model van zinkoxide

De transmissie van gedoteerde en intrinsieke zinkoxidefilms op glas is gemeten met een zogenoemde integrerende-bol-spectrometer. In het resulterende trans-

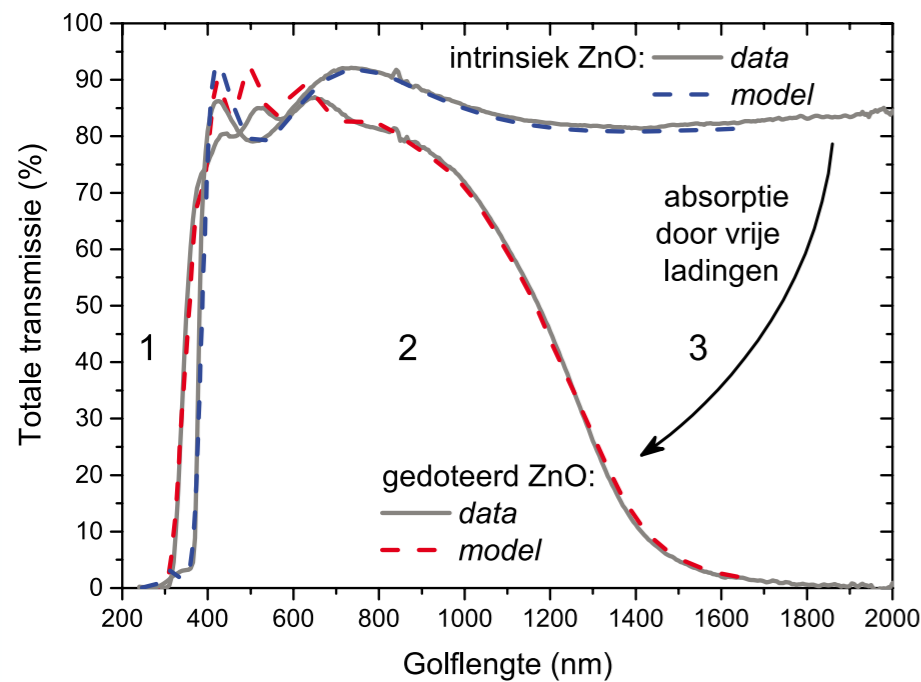
missiespectrum (zie figuur 2) van zinkoxide zijn drie regio's te onderscheiden:

1. Een absorberende regio voor fotonen met een energie groter dan de band-gap-energie (de zogenoemde inter-

band-absorptie).

2. Een nagenoeg transparante regio, waarin de maximale transparantie voornamelijk wordt beperkt door reflectie aan het oppervlak en de grens-





**Figuur 2** De transmissie van zowel intrinsiek als aluminium-gedoteerd ZnO, zoals gemeten met behulp van een integrerende-bolspectrometer. De transmissie van de ZnO films is ook gesimuleerd met modellen gebaseerd op spectroscopische ellipsometrie en Fourier-getransformeerde reflectie-infraroodspectroscopie.

vlakken (Fresnelreflectie).

3. Een regio in het infrarode gebied, waar de transmissie wordt beperkt door absorptie en reflectie door vrije ladingen in het materiaal. Deze absorptie wordt versterkt door dotering met bijvoorbeeld aluminium (de intraband-absorptie).

#### De relatie tussen de optische meting en de elektrische eigenschappen

Om de informatie over de vrije ladingen in het ZnO te verkrijgen en tevens de transmissie van zinkoxide te kunnen modelleren, is allereerst gebruikgemaakt van de optische meettechnieken spectroscopische ellipsometrie (SE), (zie kader), en (reflectie) Fourier-getransformeerde infraroodspectroscopie (FTIR). Met behulp van deze gevoelige technieken, die beide de reflectie van licht door het ZnO meten, kan behalve de dikte, de ruwheid en de brekingsindex, ook de diëlektrische functie van het zinkoxide achterhaald worden. Deze diëlektrische functie bevat informatie over zowel de interband-absorptie als over de intraband-absorptie van vrije ladingen. De bijdrage

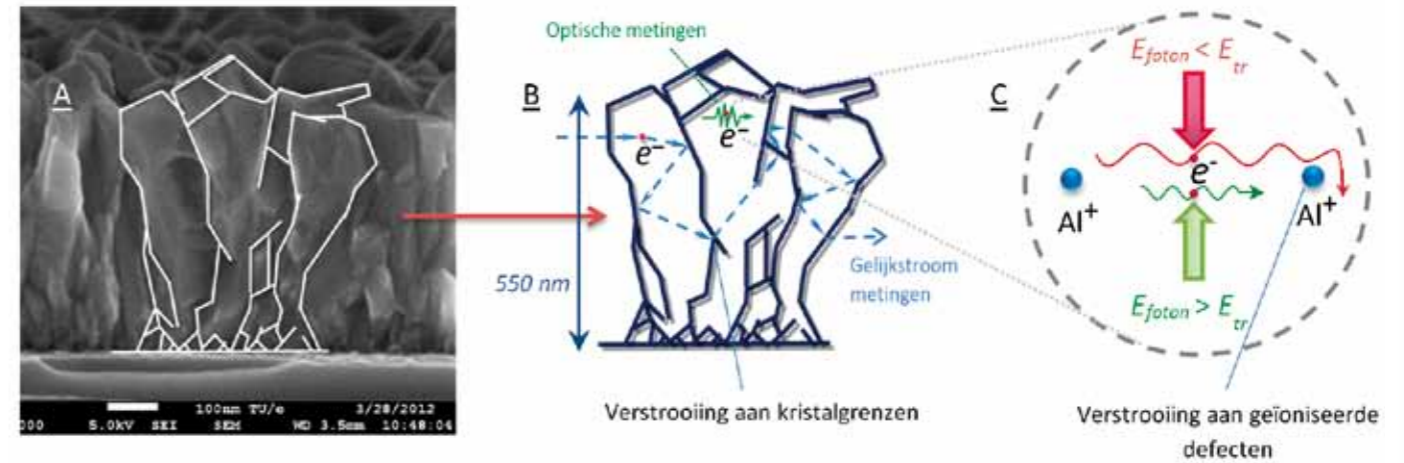
van de vrije ladingen aan de diëlektrische functie van zinkoxide is gemodelleerd met een Drude-model [8,9]. Dit klassieke model geeft het verband tussen de diëlektrische functie en de dichtheid van de vrije ladingen  $n$  en de elektrische mobiliteit  $\mu$  van deze ladingen.

Het is goed te realiseren dat de mobiliteit die verkregen wordt met het optische model, fundamenteel anders is dan de mobiliteit van de ladingen zoals gemeten door elektrische gelijkstroommetingen (bijvoorbeeld Hall-metingen). Het Drude-model gaat uit van vrije, onafhankelijk bewegende elektronen, die een constante kans op verstrooiing onder vinden. Echter, ZnO is een polykristallijn materiaal, zoals ook schematisch te zien is in figuur 3b. Op de grens tussen de verschillende kristallen bevindt zich vaak ingevangen elektrische lading, waaraan de geleidende elektronen kunnen worden verstrooid. Deze verstrooiing verlaagt de elektrische mobiliteit zoals deze wordt gemeten met gelijkstroommetingen en deze verstrooiing vindt ook plaats bij het geleiden van ladingen uit zonnecellen. In optische metingen daarentegen, onder-

vinden veel elektronen géén verstrooiing aan de kristalgrenzen, omdat de afstand die ze afleggen tijdens hun interactie met licht gemiddeld veel korter is dan de grootte van de kristallen. Dit zorgt ervoor dat de elektronmobiliteit, verkregen uit optische metingen, hoger is dan de effectieve (gelijkstroom) mobiliteit, en dat de bijdrage van verstrooiing aan kristalgrenzen aan de optische mobiliteit mag worden verwaarloosd [10]. Uit het verschil tussen de optische en gelijkstroom-mobiliteitswaarden kan de kwaliteit van de kristalgrenzen worden bepaald.

Op analoge wijze als bij verstrooiing aan de kristalgrenzen, kunnen de elektronen tijdens hun interactie met licht verstrooid worden door defecten zoals geïoniseerde ionen (figuur 3c). Wanneer elektronen een interactie hebben met licht, is hun interactielengte voor licht met een lange golflengte langer dan voor licht met een korte golflengte. Uit metingen aan gedoteerd zinkoxide blijkt dat door dit verschil in interactielengte de verstrooiing door defecten tijdens een optische meting afneemt wanneer golflengten korter dan  $\sim 1250$  nm worden gebruikt. Voor intrinsiek ZnO verschuift deze overgang verder naar het infrarood (langere golflengten), omdat dit materiaal een lagere ladingdichtheid heeft en de gemiddelde afstand tussen de ionen dus groter is.

Om het effect van de verstrooiing aan de ionen en andere defecten in ZnO accuraat mee te nemen in de optische mobiliteit is het Drude-model aangepast en de mobiliteit frequentieafhankelijk gemaakt, zoals eerder is gedaan door Ruske et al. [11]. Op deze manier wordt ervoor gezorgd dat de mobiliteit zoals verkregen uit optische metingen, over het gehele spectrum, altijd de verstrooiingen aan defecten meeneemt. Dit aangepaste Drude-model blijkt niet alleen geschikt te zijn voor het verkrijgen van adequate elektrische informatie, zoals straks aan bod komt; het blijkt ook geschikt om de transmissie van (gedoteerd) ZnO in het infrarode gebied te modelleren, zoals te zien is in figuur 2.



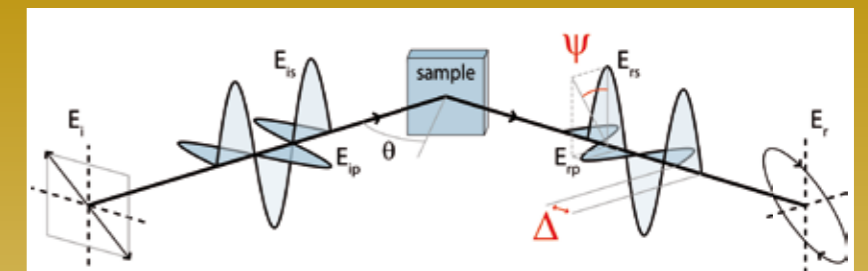
**Figuur 3** A: Een dwarsdoorsnede van ZnO, 90.000 maal vergroot door een rasterelektronenmicroscop. B: ZnO bestaat uit verschillende kristallen. Aan de randen van deze kristallen kunnen elektronen worden verstrooid, wat uiteindelijk mede de weerstand van het materiaal bepaalt in het geval van gelijkstroommetingen. C: Bij optische metingen worden elektronen, afhankelijk van de golflengte van het licht, verstrooid aan geïoniseerde aluminiumatomen.

#### Elektrische eigenschappen van zinkoxide

Met behulp van het optische model, zoals hierboven beschreven, is eerst de (gemiddelde) dichtheid van de vrije elektronen in het zinkoxide bepaald, voor zowel intrinsiek als gedoteerd ZnO. Bovendien is naar verschillende laagdikten gekeken, aangezien de kristallen zich ontwikkelen (zie figuur 3b). Zoals te zien in figuur 4 komen de resultaten van het optische model goed overeen met de resultaten van de gelijkstroommetingen. Het is duidelijk dat door het doteren met aluminium ( $1,4 \pm 0,1$  at. %, [6]), de dichtheid van de vrije elektronen met meer dan een orde van grootte kan worden vergroot van  $1,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  naar  $8,0 (\pm 0,4) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Bovendien is de dichtheid van actieve dotering constant voor alle laagdikten van aluminium-gedoteerd ZnO.

In de elektronmobiliteit komt het verschil tussen de twee meettechnieken, zoals verwacht, wel tot uiting (zie figuur 4). Met name voor lage filmdikten, ( $< 200$  nm voor intrinsiek,  $< 450$  nm voor gedoteerd ZnO), geeft de optische meting hogere mobiliteiten. Dit komt overeen met het geschetste beeld in figuur 3b, waarbij verstrooiing van de elektronen aan de kristalgrenzen optisch niet wordt gemeten, terwijl deze wel degelijk plaatsvindt bij gelijkstroommetingen. Voor toenemende filmdikten ontwikkelen de kristallen

#### Spectroscopische ellipsometrie



Tijdens spectroscopische ellipsometrie wordt het verschil in polarisatie van licht gemeten als een functie van de frequentie  $\omega$  van het licht, vóór en na reflectie op het sample. Hieruit kan de fase draaiing ( $\Delta$ ) en amplitudeverhouding ( $\tan(\Psi)$ ) worden gehaald. Dit gebeurt voor verschillende hoeken van reflectie  $\theta$ , om een hogere nauwkeurigheid te halen. Aangezien de reflectie afhangt van de diëlektrische eigenschappen van het materiaal, kan op deze manier de (complexe) diëlektrische functie  $\epsilon$  van het materiaal worden achterhaald. Deze diëlektrische functie wordt in het infrarode gebied beschreven met een Drude-model:

$$\epsilon_{\text{Drude}} = \frac{-\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\omega_\tau(\omega)},$$

waarin  $\omega_p$  de plasmafrequentie voorstelt, die wordt bepaald door de dichtheid van de vrije ladingen  $n$ , de elektronlading  $e$ , de permittiviteit van vacuüm  $\epsilon_0$ , en de effectieve massa van zinkoxide  $m^*$ :

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 n}{\epsilon_0 m^*}.$$

De term  $\omega_\tau$  wordt de demping genoemd en is gerelateerd aan de elektronmobiliteit. De dempingsterm is afhankelijk van de frequentie en voor die term is een semi-empirische relatie van Ruske et al. [11] gebruikt. Uit de frequentieafhankelijke dempingsterm kan vervolgens de (optische) elektronmobiliteit worden gehaald:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} (\omega_\tau(\omega)) = \frac{e}{m^* \mu_{\text{opt}}}.$$

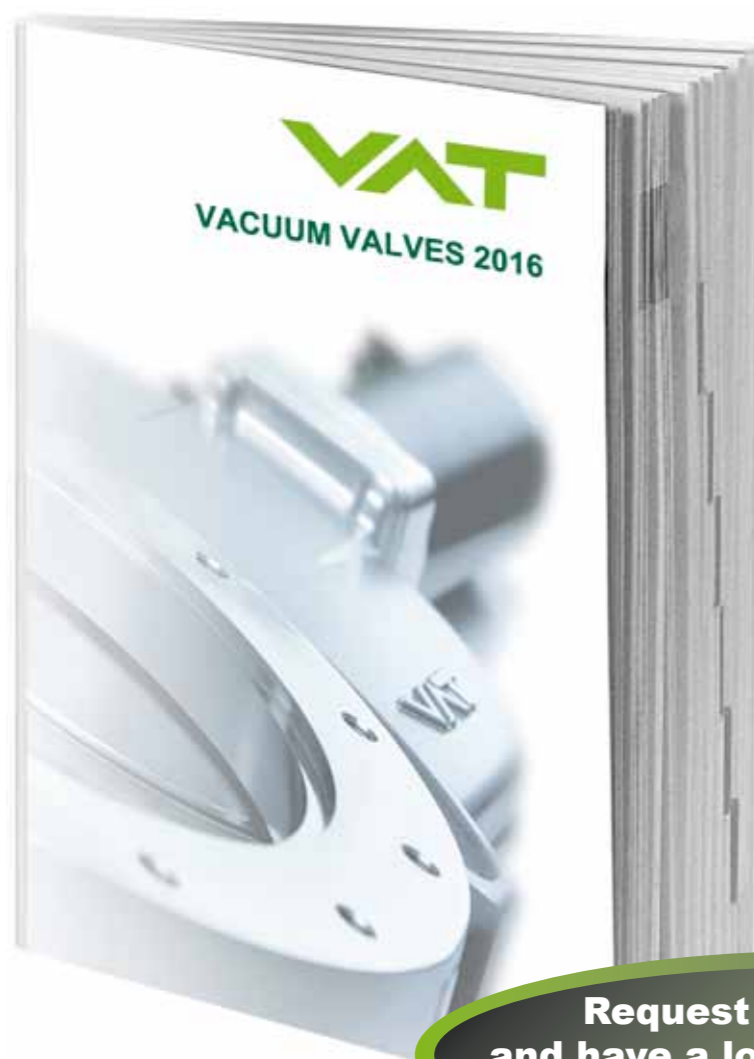




Worldwide Leader in  
Vacuum Valve Technology

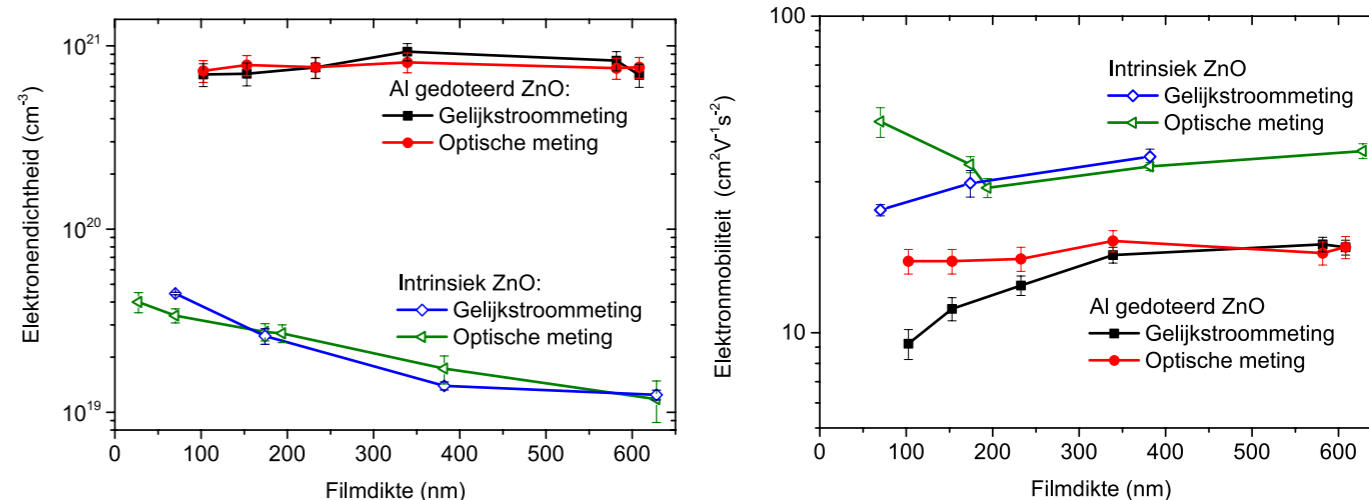
## NEW CATALOG AVAILABLE NOW

with many new products



Request your copy today  
and have a look at our wide range  
of vacuum valves

[www.vatvalve.com](http://www.vatvalve.com)



**Figuur 4** Met behulp van optische en gelijkstroommetingen zijn van zowel intrinsiek als aluminium-gedoteerd ZnO de gemiddelde ladingdichtheid (links) en de optische en gelijkstroom-elektronmobiliteit (rechts) als functie van de ZnO filmdikte bepaald.

zich, de kristallen worden groter en de kristalgrensverstrooiing neemt af. Daardoor neemt de effectieve mobiliteit toe. Het is interessant dat de optisch gemeten mobiliteit van het gedoteerd ZnO juist gelijk blijft:  $\mu = 18 \pm 2 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Tot een filmdikte van  $< 450 \text{ nm}$  is de verstrooiing van de kristalgrenzen dus effectief van belang. Het is aannemelijk dat voor dickere films de kristalgrensverstrooiing nog wel plaatsvindt, maar dat de invloed hiervan verwaarloosbaar is ten opzichte van de invloed van andere verstrooiingsmechanismen, zoals verstrooiing aan geïoniseerde verontreinigingen.

De mobiliteit van elektronen in intrinsiek ZnO is aanzienlijk hoger ( $28 - 46 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) dan de mobiliteit in gedoteerd ZnO, doordat er geen geïoniseerde aluminiumdefecten in het ZnO rooster aanwezig zijn. De mobiliteit binnen de kristalgrenzen van intrinsiek ZnO is in tegenstelling tot gedoteerd ZnO niet constant, wat veroorzaakt kan worden door de aanwezigheid van defecten. De soortelijke weerstand,  $\rho$ , wordt voor ZnO gegeven door  $\rho = (en\mu)^{-1}$ . Door de enorme toename van de vrije ladingen,  $n$ , ten opzichte van ongedoteerd ZnO, is de soortelijke weerstand afgenomen van ongeveer  $1 \cdot 10^{-2}$  naar  $4 \cdot 10^{-4} \Omega\text{cm}$  voor aluminium gedoteerd ZnO van  $500 \text{ nm}$  dikte. Daardoor zullen bij gelijke laagdikten de Ohmse verliezen in de zonne-

cel afnemen en de ladingen beter worden weggeleid. De prijs die hiervoor betaald wordt, is de afname in transmissie in het infrarode gebied.

### Conclusie

In dit werk is een optische meettechniek uiteengezet om op een adequate wijze de optische elektronmobiliteit van de ladingen in aluminium-gedoteerd en van ongedoteerd ZnO (dus met lage ladingdichtheid) te verkrijgen. Uit dit optische model kon tevens de ladingdichtheid, de dikte, ruwheid en transmissie van het ZnO worden bepaald. Het optische model is vervolgens toegepast op ZnO films van verschillende dikten, om de mechanismen achter de elektrische geleiding te onderzoeken. Hoewel voor aluminium-gedoteerd ZnO de gemiddelde ladingdichtheid constant blijft voor alle dikten, neemt de effectieve mobiliteit toe. Door toepassing van het optische model in combinatie met gelijkstroommetingen is de bijdrage van de kristalgrensverstrooiing aan de effectieve elektronmobiliteit onderzocht. Het kon worden aangetoond dat de elektronmobiliteit binnen de kristalgrenzen van het gedoteerd ZnO constant blijft, en dat de verstrooiing van vrije elektronen aan de kristalgrenzen effectief een rol speelt tot een filmdikte van  $450 \text{ nm}$ .

Vragen? Mail naar [b.w.h.v.d.loo@tue.nl](mailto:b.w.h.v.d.loo@tue.nl)

### Referenties

- 1 M.V. Ponomarev, K. Sharma, M.A. Verheijen, M.C.M. van de Sanden, and M. Creatore, *Journal of Applied Physics* **111**, 063715 (2012).
- 2 R. Groenen, J. Löffler, J.L. Linden, R.E.I. Schropp, and M.C.M. van de Sanden, *Thin Solid Films* **492**, 298 (2005).
- 3 S. Fay, L. Feitknecht, R. Schluchter, U. Kroll, E. Vallatsauvain, and A. Shah, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **90**, 2960 (2006).
- 4 K. Ellmer and R. Mientus, *Thin Solid Films* **516**, 4620 (2008).
- 5 M.F.A.M. Van Hest, J.R. Haartsen, M.H.M. Van Weert, D.C. Schram, and M.C.M. Van De Sanden, *Plasma Sources Science and Technology* **12**, 539 (2003).
- 6 M.V. Ponomarev, M.A. Verheijen, W. Keuning, M.C.M. van de Sanden, and M. Creatore, *Journal of Applied Physics* **112**, 043708 (2012).
- 7 I. Volintiru, M. Creatore, B.J. Kniknie, C.I.M.A. Spee, and M.C.M. Van De Sanden, *Journal of Applied Physics* **102**, 043709 (2007).
- 8 I. Volintiru, M. Creatore, and M.C.M. Van De Sanden, *Journal of Applied Physics* **103**, 33704 (2008).
- 9 J. Steinhauser, S. Fay, N. Oliveira, E. Vallatsauvain, and C. Ballif, *Applied Physics Letters* **90**, 142107 (2007).
- 10 T. Yamada, H. Makino, N. Yamamoto, and T. Yamamoto, *Journal of Applied Physics* **107**, 123534 (2010).
- 11 F. Ruske, A. Pflug, V. Sittinger, B. Szyszka, D. Greiner, and B. Rech, *Thin Solid Films* **518**, 1289 (2009).



## Aart Kleijn gekozen tot Fellow van de American Vacuum Society



Prof. dr. Aart W. Kleijn, bestuursvoorzitter van de NEVAC van 1991 tot 1994, is gekozen tot Fellow van de AVS (American Vacuum Society). De AVS Fellows van 2013 zullen gehuldigd worden tijdens de AVS Awards Ceremonie op woensdag 30 oktober tijdens het zestigste jaarlijkse AVS International Symposium and Exhibition in Long Beach, Californië. Meer over de AVS Fellow-onderscheiding is te vinden op: <http://www.avs.org/about-awards/fellow-of-the-society.aspx>

## Win jij ook 1000 euro?



FOTO MONICA SCHOKENBROEK

a clear edge  
the intelligent choice

**ACCLON** TECHNOLOGIES  
[www.acclontechnologies.com](http://www.acclontechnologies.com)

Edwards nXDS scroll pump is the great new shape of high performance dry vacuum pumping

Pump range includes 6, 10, 15 and 20 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>

- Advanced scroll-form and tip-seal technologies deliver best-in-class vacuum performance
- Hermetically sealed for a lubricant-free vacuum environment
- Quiet operation <52 dB(A) for minimal noise
- Intelligent and easy to use control functions
- Up to five year service interval for low cost of ownership

Find out more:  
[www.acclontechnologies.com/nxds-dry-scroll-pump/#more-271](http://www.acclontechnologies.com/nxds-dry-scroll-pump/#more-271)



**EDWARDS**  
Vacuum science... product solution.

Bart Macco (links) en Marko Sturm (tweede van rechts) kregen tijdens de NEVAC-dag op 23 april in Amsterdam de NEVAC-prijs voor de beste wetenschappelijke en technische artikelen die ze dit jaar instuurden. Ben jij de student, promovendus, of technicus die volgend jaar met een cheque op de foto staat met hoofdredacteur Hans van Eck (tweede van links) en vice-voorzitter Erwin Kessels (rechts)?

Deel je onderzoek en je kennis op het gebied van vacuümtechniek in een helder geschreven technisch of wetenschappelijk artikel van 2000 woorden. De lezers van het *NEVAC blad* hebben een technische, fysieke

of chemische achtergrond en aan jou de taak om voor dit brede publiek een begrijpelijk verhaal te schrijven. Stuur het uiterlijk 15 januari 2014 naar:

[redactie@nevac.nl](mailto:redactie@nevac.nl)

Ken je iemand die het *NEVAC blad* niet leest en wel een toepasselijk artikel kan schrijven, wijs die persoon dan op de mogelijkheid om deel te nemen. Bijdragen in het Engels van in Nederland werkende niet-Nederlands-taligen zijn ook welkom.

Uitgebreide richtlijnen voor auteurs staan op:

[www.nevac.nl](http://www.nevac.nl)



# Ceratec Technical Ceramics BV



bijdrage tot een kostenefficiënt productieproces. De kracht van Ceratec ligt in de totaalformule van probleemanalyse, ontwikkeling, prototyping en productie. Al deze disciplines vinden plaats in eigen huis.

### Ceramic inside!

Ceratec ontwikkelt samengestelde componenten, waarbij ook verbinding- en assemblagetechnieken een belangrijke rol spelen. De specifieke kennis van Ceratec op dit gebied is uniek in Europa.

### Productie

Naast diverse bewerkingstechnieken worden speciale verbindingstechnieken toegepast voor het produceren van samengestelde producten uit technisch keramiek en metaal.

De benodigde metaalbewerkingen worden in eigen huis uitgevoerd, evenals de assemblage.

Ceratec produceert zowel kleine als grotere series. Tijdens het productieproces vinden voortdurend kwaliteitscontroles plaats in de moderne meetkamer.

### Ceramic on the right spot!

Ceratec Engineering staat garant voor professionele ondersteuning op het gebied van materiaalkeuze, economisch ontwerp en begeleiding van inbouw van keramische componenten. Ceratec gebruikt technisch keramiek voor producten waar de materiaaleigenschappen een duidelijke meerwaarde geven. Slijtageproblemen bij metalen of kunststof onderdelen kunnen bijvoorbeeld de aanleiding zijn om Ceratec Engineering in te schakelen.

### Standaardproducten

Hightechontwikkelingen hebben bij Ceratec geleid tot een uitgebreide range van standaard keramische componenten voor de industrie. Voor snelle en doeltreffende oplossingen.

### Innovative solutions!

Ceratec is sinds 1983 gespecialiseerd in technisch keramiek. Daar waar metalen of kunststof onderdelen niet goed meer functioneren, kan Ceratec vaak keramische oplossingen bieden. Voor het ontwikkelen van keramische componenten en samengestelde producten, maakt Ceratec gebruik van moderne CAD- en engineering-systemen zoals Solid Works en Cosmos. Ceratec levert klantgerichte oplossingen die resulteren in langere standtijden, lagere onderhoudskosten en minder productiestoringen. Kortom een



Poppenbouwing 35  
4191 NZ Geldermalsen  
Nederland  
T: +31 345 580101  
F: +31 345 577215  
E: ceratec@ceratec.nl  
www.ceratec.nl



## Agenda

9-13 september 2013  
NEVAC-excursie Parijs  
[www.nevac.nl](http://www.nevac.nl)

9-13 september 2013  
IVC-19/ICSS-15, Parijs  
[www.ivc19.com](http://www.ivc19.com)

23-26 september 2013  
ICON 2013, Annecy, Frankrijk  
[www.icon2013.fr](http://www.icon2013.fr)

13-16 oktober 2013  
ICTF16, Dubrovnik, Kroatië  
[www.ictf16.com](http://www.ictf16.com)

27 oktober-1 november  
AVS 60th International  
Symposium and Exhibition  
Long Beach CA, VS  
[www.avs.org](http://www.avs.org)

1 december 2013  
verschijning NEVAC blad  
vol 51 nr 3

## Excursie Parijs, 9-13 september

De Europese buitenlandexcursie gaat dit jaar naar Frankrijk. Rond het 19<sup>e</sup> Internationale Vacuüm Congres IVC-19 dat van 9 tot 13 september

wordt gehouden, organiseert de excursiecommissie van de NEVAC een bezoek aan Parijs. Naast het beursbezoek zullen er ook uitstapjes naar bedrijven in de nabijheid worden georganiseerd en gaan we naar de Universiteit. We hopen op een uitnodiging van het Franse Kernfysica Instituut CEA in Saclay. Verder zullen we de culturele kant van de Franse hoofdstad niet links laten liggen en onder meer een bezoek organiseren aan het techniekwalhalla Le Palais de la découverte, en wellicht een schouwburgbezoek of een kunstmuseum. Ook zal voldoende vrije tijd wor-



den ingeruimd om langs Les Halles te gaan of om te shoppen op de Champs Élysées of bij Lafayette. Misschien zelfs een beklimming van de Tour Montparnasse of helemaal heuvelop naar Montmartre met zijn Sacré Coeur!

We gaan met de bus. Houd die week dus vrij en het weekend ervoor en erna ook en schrijf je vast in op de NEVAC-website: [www.nevac.nl](http://www.nevac.nl).

Begin juli wordt er een deelnemersbijeenkomst gehouden om het programma gezamenlijk definitief vast te stellen. Allen die zich tijdig hebben opgegeven ontvangen hierover bericht.

## STP Maglev Serie

Betrouwbaar & Betaalbaar

**ACCLON** TECHNOLOGIES  
[www.acclon.com](http://www.acclon.com)



Edwards STP maglev turbopompen

... van 250 tot 4.500 ltr/sec

... volledig magnetisch gelagerd

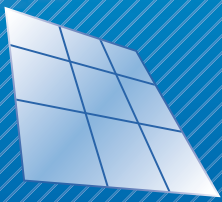
... hoge compressie

... UHV uitvoeringen

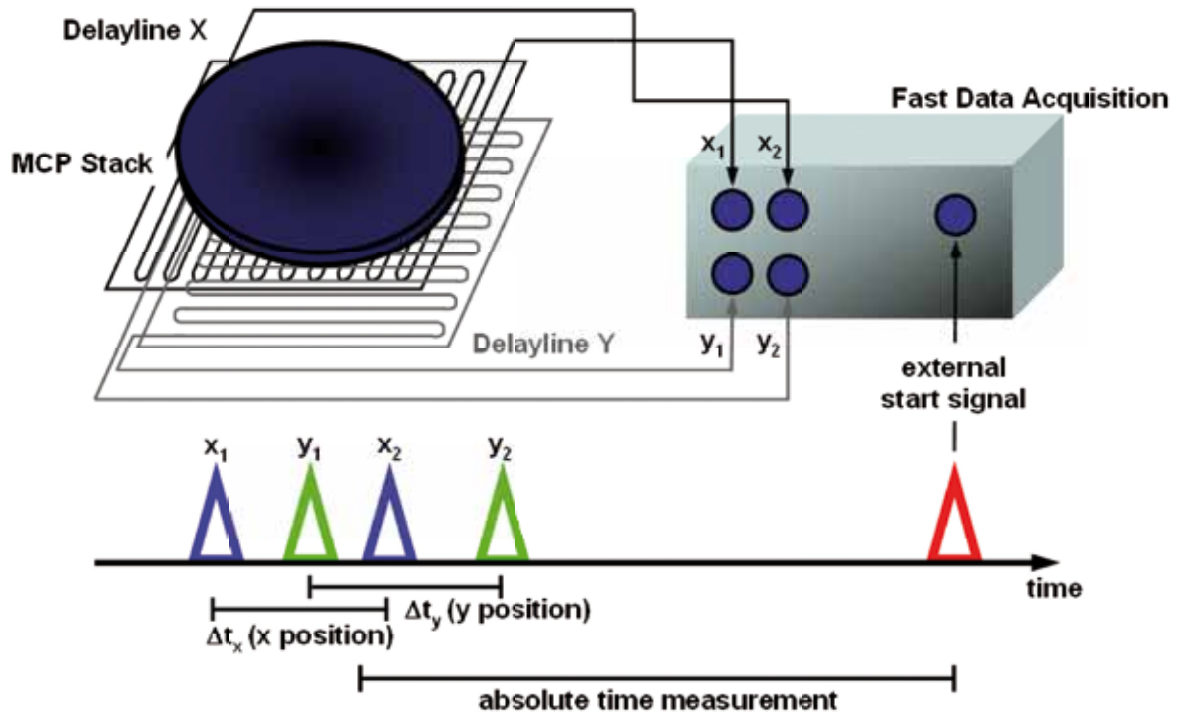
... profibus compatible

**EDWARDS**  
Vacuum science... product solution.





## Principle of the 3D (x, y, t) delayline operation



## Delay Line Detector Systems

### Strengths

- No read out noise
- High time resolution
- High sensitivity in low signal levels
- Counting electrons, ions, x-rays and UV
- Position and time information in single event counting

### Benefits

- Imaging with high contrast at low source intensities
- Imaging of electrons, ions, X-rays, UV
- High time resolution in TOF experiments
- Long measurement times in TOF experiments

### Applications

- Analysis techniques like XPS, TOF
- Synchrotron experiments
- Electron microscopy
- Particle imaging

