

NEVAC

jaargang 59 nummer 2 juli 2021



NEDERLANDSE
VACUÛMVERENIGING

blad

NEVAC Symposium: Veel EUV, maar ook andere kleuren in het vacuüm

Een magnetische seismoscoop van elf
atomen

CO₂ als grondstof voor synthetische kerosine

HAXPES: XPS met harde röntgenstralen
zonder synchrotron

Why TURBOVAC i?

The Ultimate Vacuum Performance



We have extended our TURBOVAC i/iX pump family especially for industrial, coating and research applications that require robust pumps with higher pumping speeds.

The new 1350 and 1450 sizes and its variants have been developed to maximize the pumping speeds making the TURBOVAC i/iX series now complete with 8 models ranging from 90 to 1450 l/s sizes.

- Fast cycle times, high process throughputs and lower cost of ownership
- Higher resistance to particles for increased up time and peace of mind
- Easy to integrate into existing systems and can be run in any orientation, with special U variant for 1350i and 1450i variants



Leybold Nederland B.V.
Floridadreef 102
NL-3565 AM Utrecht
sales.ut@leybold.com



Pioneering products. Passionately applied.

Inhoud

- 4 (PhD) Student? NEVAC belooft je verhaal met 1000 of 250 euro!
- 5 **Van de redactie:** Afscheid en welkom *Claud Biemans*
- 6 Spingolven meten: Een magnetische seismoscoop van elf atomen
Robbie Elbertse
- 10 NEVAC Symposium bij ARCNL: Veel EUV, maar ook andere kleuren in het vacuüm *Claud Biemans*
- 14 Wie wordt onze secretaris?
- 15 **60 jaar NEVAC:** 13 april 2022, Rijksmuseum Boerhaave, Leiden
- 16 HAXPES: XPS met harde röntgenstralen zonder synchrotron *Ad Ettema*



- 20 **Stel je voor:** Frans van Roosmalen
- 22 **CO₂ als grondstof voor synthetische kerosine en het belang van plasma voor hergebruik van CO₂**
Alex van de Steeg & Adelbert Goede
- 26 **Gezocht:** Hoofdredacteur en redactieleden voor het NEVAC blad
- 27 Agenda

10 Een kijkje in de NXE3400B wafermachine van ASML met EUV-bron. Tijdens het NEVAC Symposium was er veel aandacht voor werken met EUV in de nieuwste machines van ASML.

Colofon

Redactie

Claud Biemans, eindredacteur
Hans van Eck, hoofdredacteur
Rients de Groot
Bart Macco
Karine van der Werf

redactie@nevac.nl

Grafische vormgeving

Claud Biemans
www.frontlinie.nl

Verschijningstijdstippen 2021

April
Juli
December

Web-adres

www.nevac.nl

Abonnementen

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

Advertentie-exploitatie

NEVAC
penningmeester@nevac.nl

Kopij inzenden naar redactie@nevac.nl
Lidmaatschap en abonnementen opgeven bij de ledenadministratie, penningmeester@nevac.nl.

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

De sluitingsdatum van kopij voor het volgende nummer van het NEVAC blad is 15 oktober 2021

(PhD) Student?

NEVAC belooft je verhaal met 1000 of 250 euro!



De Nederlandse Vacuümvereniging (NEVAC) reikt ieder jaar een prijs uit van 1000 euro voor het beste ingezonden artikel voor het *NEVAC blad*, geschreven door een student of promovendus. Het artikel, van ongeveer 2000 woorden, moet gaan over eigen onderzoek waarin het gebruik van vacuümtechniek wordt toegelicht. De lezerskring bestaat uit onderzoekers, medewerkers van bedrijven in de vacuümtechniek, en technici. De kunst is dus helder te schrijven voor dit brede publiek. De winnaar mag een lezing geven tijdens de NEVAC-dag, in de lente van volgend jaar. Er wordt één winnaar aangewezen door de jury, maar alle gepubliceerde artikelen van studenten en promovendi worden door de NEVAC beloond met 250 euro.

Niet-Nederlandstaligen mogen in het Engels schrijven.

De volgende deadline is 1 februari 2022. Inzendingen kunnen naar: redactie@nevac.nl.

Uitgebreide richtlijnen voor het artikel staan op nevac.nl/NEVAC_Blad/richtlijnen_auteurs.php

Each year the Dutch Vacuum Society (NEVAC) awards a prize of 1000 Euro to the student who writes the best article, related to vacuum technology, for the *NEVAC blad*. The article (around 2000 words), should describe your research and focus on the vacuum technology used. The readers of the magazine are researchers, vacuum technology company members, and technicians. Your assignment is to write an appealing story for this wide audience. The winner is invited to present the winning paper during the NEVAC-dag in spring next year.

Only one winner will be appointed, but NEVAC rewards all published articles, written by students, with 250 Euro.

If Dutch is not your native language, you are allowed to write in English.

The next deadline is 1 februari 2022. Send your contribution to: redactie@nevac.nl.

Guidelines for the article are published here: nevac.nl/NEVAC_Blad/richtlijnen_auteurs/English.php

NEVAC rewards your article with 1000 or 250 euro!



Verenigingsgegevens

Ereleden

L.G.J.M. Hassink
G. Ikking
† Prof.dr. J. Kistemaker
† Ir. J.H. Makkink
Th. Mulder
Dr.ir. E.P.Th.M. Suurmeijer
Prof.dr. J. v.d. Veen
Dr.ir. J. Verhoeven

Bestuur

Prof.dr. S.J. van der Molen, voorzitter
Dr. I. Swart, vicevoorzitter
vacature, penningmeester
Fred Schenkel, secretaris

Verenigingssecretariaat

Fred Schenkel
secretaris@nevac.nl

Ledenadministratie

penningmeester@nevac.nl

Inlichtingen over opleidingen en examens

Dr. A.D. van Langeveld
Gageldonk 12, 4854 LH Bavel
06-29561797
advanlangeveld@gmail.com

Penningmeester NEVAC

IBAN: NL50 INGB 0001 8515 29 o.v.v.:
Penningmeester NEVAC
penningmeester@nevac.nl

Contributies

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

Afscheid en welkom

Tijdens de ALV op 12 mei dit jaar, heeft de NEVAC afscheid genomen van twee gewaardeerde bestuursleden die gedurende vele jaren zeer veel werk voor de vereniging hebben verzet: secretaris Jan van Kessel en penningmeester Ad Ettema. Ik ontmoette beiden voor het eerst in 2012 aan de Technische Universiteit Eindhoven, tijdens de entree van voormalige NEVAC-voorzitter Erwin Kessels. Ad was toen bezig met het samenstellen van een nieuwe redactie van dit blad en de vereniging zocht daarvoor ook een eindredacteur. Tijdens de rondleiding door de labs in Eindhoven hebben zij me daarvoor gevraagd, met als resultaat een langdurige prettige samenwerking.



Ad was zowel penningmeester als redacteur van dit blad, dit altijd naast een drukke baan, de laatste jaren bij Scienta Omicron. In dit nummer leest u over dat werk in zijn artikel over HAXPES. Jan was naast secretaris actief in de commissie opleidingen. Samen werkten we enkele jaren geleden aan de vernieuwing van de website. Na zoveel jaren en zoveel inzet is het logisch dat beiden nu het stokje overdragen aan anderen. Ad en Jan, heel veel dank!

De NEVAC is verheugd dat Fred Schenkel, leraar aan de LIS (Leidse Instrumentmakersschool), per 1 juli de taak van secretaris gaat overnemen. Fred is geen onbekende, want hij was eerder winnaar van de NEVAC-prijs 2012 en enkele jaren redacteur van dit blad. Ook zorgde hij voor de inhoud van de website. Welkom terug Fred!

De vereniging zoekt nu nog een penningmeester, liefst iemand uit het bedrijfsleven. Meer informatie via voorzitter@nevac.nl

Zonder actieve leden kan ook het NEVAC blad niet bestaan, daarom zijn we blij dat we een nieuwe redacteur mogen verwelkomen: Bart Macco, postdoc in de Plasma & Materials Processing-groep aan de TU/e. Bart heeft vorig jaar, samen met Erwin Kessels, als gastredacteur de mooie special over atoomlaagdepositie in Nederland samengesteld (NEVAC blad 2020-2). Wilt u ook als redacteur een bijdrage leveren aan dit blad, dan kunt u zich melden via redactie@nevac.nl

Claud Biemans

Een magnetische seismoscoop van elf atomen

In het jaar 132 AD bouwde de Chinese uitvinder Zhang Heng een apparaat: een soort grote metalen vaas met daaromheen acht drakenhoofden die balletjes in de bek vasthouden. Op het moment dat er 500 km verderop in het rijk een aardbeving plaatsvond viel het balletje in de juiste richting van die aardbeving. Nu is een atomaire versie gebouwd van deze seismoscoop, voor het meten van magnetische trillingen in een bepaalde richting. De detectie kan, net als toen, achteraf plaatsvinden, niet door middel van een gevallen balletje, maar door een omgeklapt magneetveld. Hoe werkt zoiets?

Robbie Elbertse, R.J.G.Elbertse@tudelft.nl



Figuur 1 Seismoscoop van Zhang Heng in het Chinese Museum in Alberta, Canada.

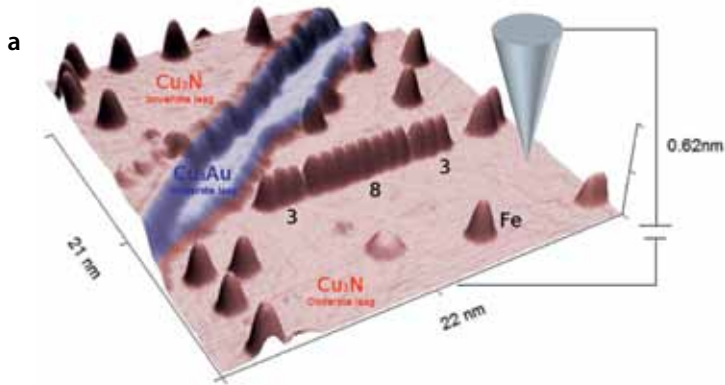
Scanning Tunneling Microscope (STM)

Het meetsysteem dat we gebruiken is een STM, zoals weergegeven in figuur 2a. Hierbij hangt een atomair scherpe tip (blauw) boven een oppervlak op een afstand van een paar ångström ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$). Op deze afstand, vergelijkbaar met de grootte van een enkel atoom, kunnen elektronen *tunnelen* door het vacuüm tussen de tip en het oppervlak. Door een spanning aan te leggen tussen beide kan deze stroom gemeten worden. De stroom hangt exponentieel af van de afstand tussen tip en oppervlak en biedt een afbeelding met hoge resolutie van de hoogte van (atomen op) het oppervlak. Door de tip over het oppervlak te bewegen, met een feedbacksysteem waardoor de stroom gelijk blijft, kan men heel makkelijk een 3D-visualisatie maken van het oppervlak. In 1986 is hiervoor de Nobelprijs uitgereikt aan Gerd Binnig en Heinrich Rohrer.

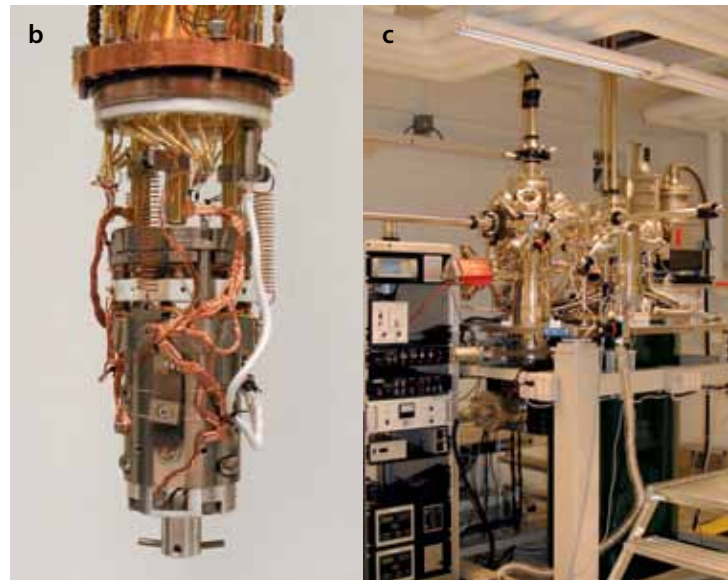
Met zo'n tip kunnen we niet alleen de atomen *zien*, maar we kunnen ze zelfs oppakken en neerleggen om zo atomaire structuren te bouwen. In ons experiment hebben we gekozen voor een substraat van Cu_3Au , met eilanden van Cu_2N waarop individuele Fe atomen zitten. In de figuur is ook een keten van 3-8-3 Fe atomen te zien: dit is zowel onze seismoscoop (8-3) als de keten (3) waarvan we de magnetische trillingen willen bestuderen.

Seismoscoop bouwen

Het is allemaal wel leuk en aardig dat we zo'n seismoscoop kunnen bouwen, maar het lukt alleen onder bijzondere omstan-



Figuur 2 (a) Een metalen tip hangt boven een oppervlak. Door de aangebrachte spanning gaan elektronen tunnelen en ontstaat er een stroom tussen de tip en het oppervlak. Hiermee kan een sample gemeten worden met atomaire precisie. Te zien in de 3D-visualisatie is: individuele Fe atomen, CuN lagen, het Cu_3Au substraat en een keten van 3-8-3 Fe atomen. (b) Foto van de STM-kop. (c) Foto van de meetopstelling, gezien vanuit het oog in figuur 3.

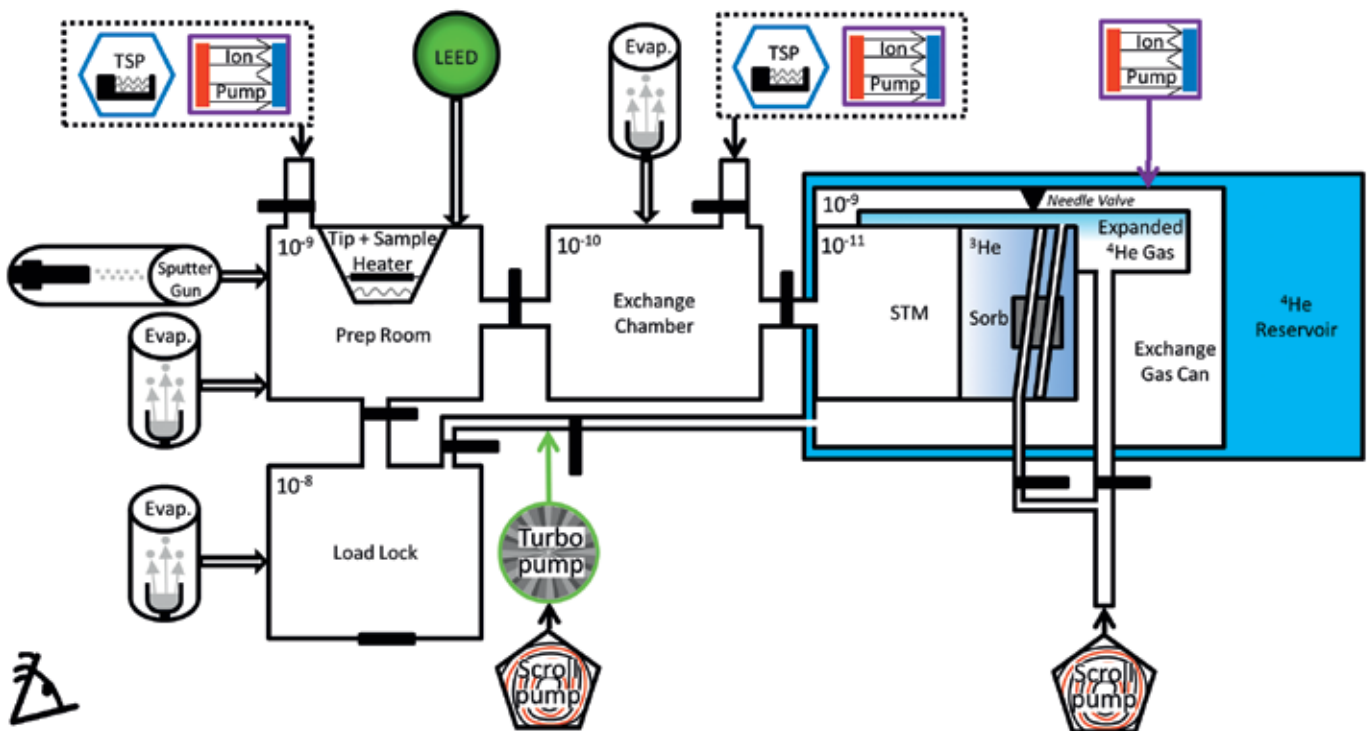


digheden. Allereerst is het van belang dat dit allemaal bij lage temperatuur gebeurt. Dit is noodzakelijk voor zowel de stabiliteit – bij een te hoge temperatuur zullen de Fe atomen bewegen op het Cu_2N eiland – als voor de energieresolutie: bij een te hoge temperatuur is de thermische energie, die we als een soort ruis kunnen zien, groter dan het signaal dat we willen meten. Om die reden zit onze STM in een vacuümsysteem, gekoeld door ^4He en zelfs ^3He , om zo tot 300 mK te

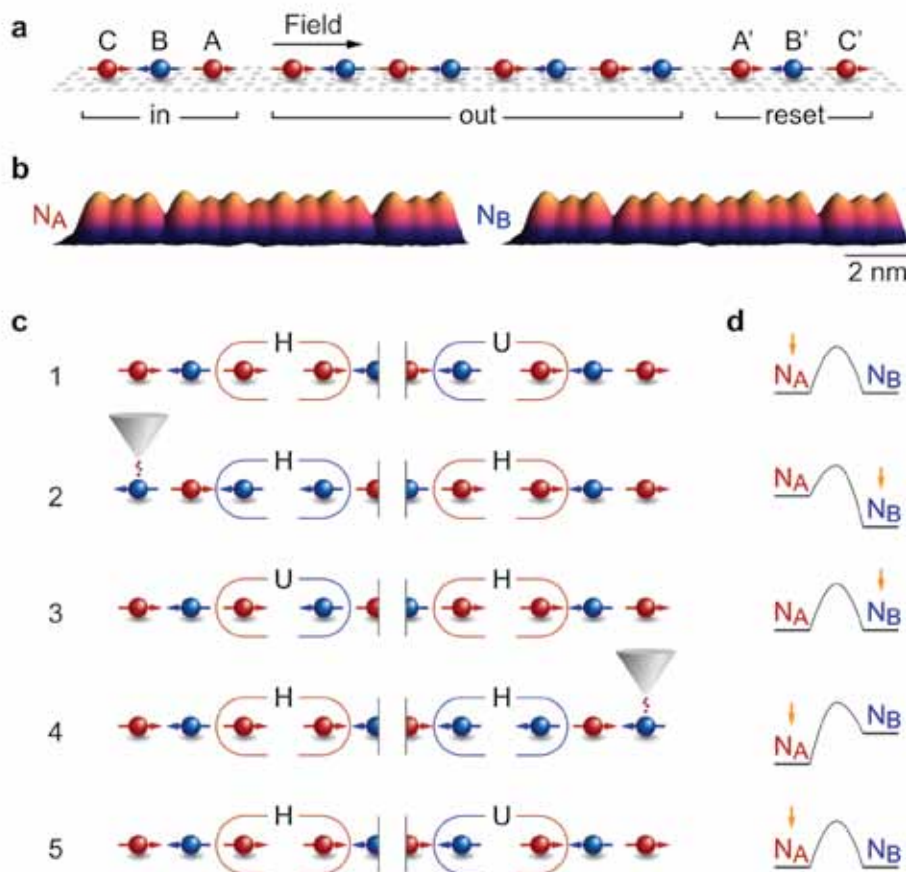
gaan. Bij zulke lage temperaturen heb je een uitstekend vacuümsysteem nodig: anders zorgen de gasmoleculen voor te veel warmte-uitwisseling. Zonder vacuümsysteem wordt onze seismoscoop ook bedekt met water of zuurstof.

In dit geval gaan we tot 10^{-11} mbar – ter vergelijking, de druk op de maan is 10^{-12} mbar. Dit doen we met behulp van een scrollpomp (Agilent IDP-7), turbopomp (Varian TV 301 Navigator, tegenwoordig Agilent) en enkele ionenpompen en Ti-

tanium Sublimation Pumps (TSPs) (samen een Varian Starcell). In figuur 3 is te zien hoe onze opstelling in elkaar zit. Zo wordt onze STM normaal gesproken op 1 K gehouden door geëxpandeerd ^4He gas. We kunnen dit voor zo'n 30 uur verlagen naar 300 mK door ^3He te laten expanderen. Dit doen we door gebruik te maken van een sorb: een poreus blokje kool dat op lage temperatuur gassen adsorbeert, waardoor de druk lager wordt in de gesloten ^3He container.



Figuur 3 Overzicht van het vacuümsysteem. Zwarte balken stellen kleppen voor. Bij elke vacuümruijme staat linksboven de typische druk in mbar. Afkorting "Evap." staat voor evaporator. In verband met trillingen is de rechter scrollpomp fysiek ver verwijderd van het systeem, deze mag immers niet uit. Het oog linksonder geeft aan waar de foto in figuur 1c is genomen.



Figuur 4 (a) Een schematisch overzicht van de 3-8-3 structuur, bestaande uit een inputketen (links, lengte 3), outputketen (midden, lengte 8) en resetketen (rechts, lengte 3). Atomen in de input en reset zijn vanaf de output naar buiten toe alfabetisch gelabeld. Kleuren rood en blauw stellen respectievelijk de toestanden voor van voornamelijk $S_z = +2$ en $S_z = -2$. (b) Zij-aanzicht van een 3-8-3 structuur met de twee toestanden N_A en N_B van de output. (c) Versimpelde operatiecyclus in vijf stappen; zie tekst voor meer uitleg. Energetisch voordelige koppelingen zijn aangegeven met een "H" (happy), onvoordelige met een "U" (unhappy). (d) Versimpeld energiediagram waarin N_A en N_B in de vijf stappen van (c) beschreven worden. De pijl geeft de toestand van de output aan.

Voor extra thermische isolatie is er een vacuüm tussen de ^3He container en het ^4He reservoir, dat in stand gehouden wordt door een ionenpomp (Thermionics IP-020). De sample in de STM is een commercieel gekocht Cu(100) kristal, schoongemaakt met Ar sputtering via de sputter gun (RBD Instruments IG2) en uitgestookt via de sample heater (UNISOKU), waarna de Cu_2N -eilanden worden gegroeid door N_2 te sputteren op de sample. Deze meetopstelling en vacuümapparatuur is gekocht via UNISOKU Ltd., alhoewel sommige randapparatuur later is toegevoegd (LEED en evaporators van SPECS: ErLEED, EBE-1 en EBE-4). Dit meetsysteem heeft tot meerdere belangrijke publicaties geleid, waaronder [1][2][3] en, van dit artikel,

[4], plus de recente publicatie van eind mei in *Science* [5].

Spingolven

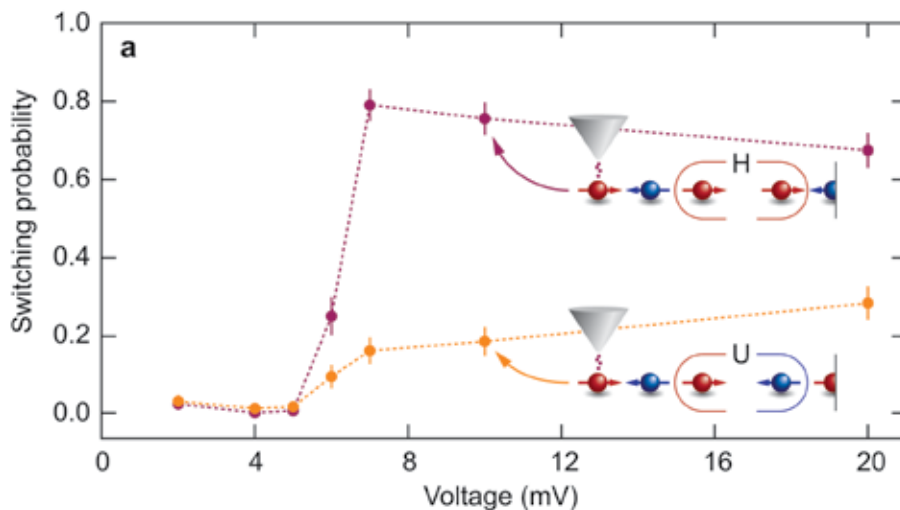
Terug naar die magnetische trillingen, ookwel magnetische golven genoemd: hoe zijn die anders dan elektromagnetische golven? De naam zegt het al: elektrische velden spelen hierbij geen rol. Een elektromagnetische golf kennen we in de vorm van licht: de golflengte bepaalt de kleur. Dat zijn golven die zich in materialen, maar ook in vacuüm kunnen voortplanten: ze hebben geen medium nodig. De magnetische golven waar het in dit geval om gaat hebben wel een medium nodig: atomen die een zogenaamde *spin* S met zich meedragen. Dat houdt in dat ieder atoom zelf een klein magneetje is.

Een ijzeratoom is een deeltje met *totale spin* $S_z = 2$ (het heeft vier ongepaarde elektronen). Dit geeft vijf energieniveaus die voor ons van belang zijn ($S_z = -2$, $S_z = -1$, $S_z = 0$, $S_z = 1$ en $S_z = 2$). Aangezien het een quantumdeeltje is, kan het atoom zich in een superpositie van meerdere toestanden bevinden, maar we nemen voor het gemak even alleen de pure toestanden $|+\rangle = (S_z = +2)$ en $|-\rangle = (S_z = -2)$. Door de manier waarop de ijzeratomen in het Cu_2N netwerk liggen, ervaren ze twee belangrijke potentialen: het kristalveld die de spin in een bepaalde richting duwt, en de interatomaire koppeling. Deze twee ingrediënten, samen met een extern magneetveld van een paar tesla is alles wat we nodig hebben om de natuurkunde te beschrijven. Dit alles leidt tot een paar basisregels:

1. Naburige atomen in een subketen *zullen* in tegenovergestelde richting staan.
2. De meerderheid van de atomen in een subketen *probeert* $|+\rangle$ te zijn.
3. Naburige atomen tussen ketens *willen* in gelijke richting staan, en zijn (H)appy als dat lukt en (U)nhappy als dat niet lukt. Zoals te lezen in de schuingedrukte woorden gaan deze regels van sterk naar zwak: dit geeft ook de grootte van de bijbehorende energieën aan. Tijdens het experiment zal de eerste regel altijd blijven gelden, maar zal de tweede en derde regel tijdelijk onderbroken worden. Wel zal, wegens de derde regel, de seismoscoop triggeren.

Seismoscoop

We beschrijven dit aan de hand van figuur 4. In figuur 4a is een schematische weergave van de seismoscoop gegeven. De kleur van de atomen geeft de dominante spintoestand aan in de grondtoestand: de toestand met de minste energie. Hierbij stelt rood $|+\rangle$ voor, en blauw $|-\rangle$. Bij een spin-gepolariseerde STM-meting kan men deze spintoestand aflezen aan de hand van de schijnbare hoogte, zoals in figuur 4b te zien is. Daar is ook te zien dat de *outputketen* in twee toestanden



Figuur 5 Switching probability dat de outputketen omklapt als functie van pulsvoltage op inputketen. Hierbij is H vanuit een “happy” kant ($N_A \rightarrow N_B$) en U vanuit een “unhappy” kant ($N_B \rightarrow N_A$), zie tekst voor meer uitleg.

kan verkeren: N_A en N_B . Dit kan omdat beide toestanden voldoen aan de drie basisregels (ga maar na!). We hebben echter een tip waarmee we de boel kunnen exciteren, en daarmee de seismoscoop kunnen laten triggeren, zie figuur 4c. In de analogie is dit het vallen van het balletje; hier is dit het omklappen van de magnetische toestand van de keten van de outputketen. In stap (1) zitten we in de beginsituatie, met, zoals in figuur 4a aangegeven, de outputketen in toestand N_A . Merk op dat beide toestanden N_A en N_B dezelfde energie hebben. In stap (2) heeft de tip de inputketen met behulp van tunnelelektronen geëxciteerd naar de eerste aangeslagen toestand. Hierin voldoen de ketens nog wel aan regel 1, maar niet aan regel 2. Als gevolg van regel 3 gaat de outputketen nu naar toestand N_B . (3) Zodra de tip wordt weggehaald blijft de outputketen in toestand N_B . (4) Door hetzelfde te doen aan de andere kant, kan de outputketen weer terug naar toestand N_A worden gebracht (5).

Nieuwe tool

Hoe brengen we de input in de aangeslagen toestand? Daarvoor heeft de inputketen 7 meV nodig. Eenmaal in zo’n aangeslagen toestand, zal de excitatie zich verspreiden over de keten. Deze verspreiding van de excitatie is niet alleen een verspreiding van de energie over de

keten, maar ook van spinverandering. Dit is de spingolf, de magnon of magnetische golf (in deze context allemaal hetzelfde). Stel we initiëren zo’n spingolf op atoom C (zie figuur 4a) door een korte voltagepuls, dan kan, via de spingolf, de spintoestand van atoom A veranderen. Dit wordt dan gevoeld door de outputketen (die van Happy naar Unhappy gaat, zie regel 3), die vervolgens wil omklappen van N_A naar N_B . De kans dat zo’n omklapping gebeurt noemen we de *switching probability*.

Gezien de spingolven dus alleen ontstaan zodra de elektronen zo’n 7 meV met zich meedragen, kunnen we uit figuur 5 afleiden dat onze sensor werkt naar behoren. Hierin wordt de waarschijnlijkheid weergegeven dat de outputketen van N_A naar N_B gaat (of vice versa) als functie van de elektronenergie die atoom C van de input aanslaat (stap 2 in figuur 4c). Bij het uitvoeren van zo’n puls op de inputketen is de verwachting dat dit alleen werkt als de koppelingen die de outputketen links en rechts voelt beginnen op HU (Happy-Unhappy) en door de puls naar UU (Unhappy-Unhappy) gaan. Dit zal er dan voor zorgen dat de outputketen liever omklapt om zo HH (Happy-Happy) aan beide kanten te voelen. Dit is dus de $N_A \rightarrow N_B$ situatie. Mocht de beginsituatie UH (Unhappy-Happy) zijn, dan zal het veranderen van de linker koppeling naar

HH (Happy-Happy) weinig teweegbrengen: er is geen reden voor de outputketen om om te klappen. Zo is dus de $N_B \rightarrow N_A$ situatie veel minder waarschijnlijk. Dit zien we ook duidelijk terug in figuur 5: de switching probability vanuit H is veel groter dan vanuit U. De sensor werkt dus naar behoren!

Oké, dat is de simpele beschrijving. Door metingen en simulaties weten dat de spingolven in de ketens zich in werkelijkheid gecompliceerder ontwikkelen. Maar met deze sensor hebben onderzoekers een nieuwe “tool in the toolbox” voor het bestuderen van magnetische golven in atomaire structuren.

Referenties

- 1 A. Spinelli et al., Imaging of spin waves in atomically designed nano magnets, *Nature Materials* **13**, 782 (2014).
- 2 R. Toskovic et al., Atomic spin-chain realization of a model for quantum criticality, *Nature Physics* **12**, 656 (2016).
- 3 F.E. Kalf, A kilobyte rewritable atomic memory, *Nature Nanotechnology* **11**, 926 (2016).
- 4 R.J.G. Elbertse et al., Remote detection and recording of atomic-scale spin dynamics, *Communications Physics* **3**, 94 (2020).
- 5 L.M. Veldman et al., Free coherent evolution of a coupled atomic spin system initialized by electron scattering, *Science* **28**, 372 (2021).

Robbie Elbertse studeerde Technische Natuurkunde aan de TUD. Na zijn Master-project bij Sander Otte te hebben gedaan is hij daar doorgesloopt tot promovendus. Hij doet daar onderzoek naar spingolven op atomaire ketens.

NEVAC Symposium bij ARCNL

Veel EUV, maar ook andere kleuren in het vacuüm

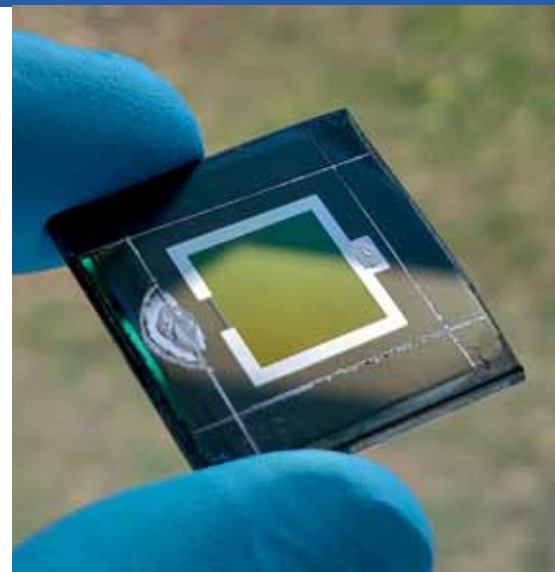
Hoe belangrijk de vacuümtechniek is voor de samenleving blijkt elk jaar opnieuw tijdens de jaarlijkse NEVAC-dag, dit jaar omgedoopt tot NEVAC Symposium. Joost Frenken, Jan Verhoeven en Roland Bliem van ARCNL verzorgden een uitgebreid programma met sprekers, flitspresentaties, een film en een virtuele rondleiding door de labs. Helaas was het nog niet mogelijk om de dag live in Amsterdam te organiseren, maar zodra het weer mogelijk is nodigt ARCNL de NEVAC-leden uit voor een bezoek aan het instituut.

Claud Biemans

Moleculen zien in de mens

Ron Heeren (M4i, Maastricht University) opende de dag met een aansprekend verhaal over hoe innovatieve moleculaire microscopen worden ingezet voor real-time informatie in de geneeskunde. Vacuümtechniek is daarvoor van essentieel belang. In Maastricht worden elektronenmicroscopie en massaspectroscopie gecombineerd in M4i, de Multimodale Moleculaire Imaging infrastructuur. De belangrijkste factor voor succes in dit

onderzoek is volgens Heeren: de juiste mensen bij elkaar krijgen. In zijn groep werken chemici, natuurkundigen en geneeskundigen samen aan de vraag: Hoe ziet de mens eruit op moleculair niveau? Cellen zijn geen statische structuren die op zichzelf staan, maar er is continu wisselwerking met de omgeving. Daarom kunnen real-time beelden van weefsels en structuren binnen cellen veel waardevolle informatie opleveren bij de behandeling van ziektes zoals kanker. Gedetailleerde informatie op moleculair niveau is door het combineren van verschillende types microscopie mogelijk zonder dat een patiënt een contrastvloeistof krijgt toegediend. Hierdoor worden diagnoses beter en behandelingen sneller. Met behulp van artificiële intelligentie en machine learning kan er steeds sneller meer informatie uit deze multimodale afbeeldingen van cellen gehaald worden. Een chirurg kan zo tijdens een operatie al zien of een tumor goed verwijderd is. Nu duurt de analyse van snijranden vaak nog een week.



Tandem-zonnecel, ontwikkeld door Helmholtz Zentrum Berlin, combineert een perovskiet en CIGS en bereikt zo een efficiency van 23.26 procent. Foto HZB

Opschalen van zonnecelproductie

Dat vacuümtechniek een belangrijke rol speelt bij de energietransitie, bleek uit het verhaal van Rutger Schlatmann (Helmholtz Zentrum Berlin en PVcomB). Vacuüm is essentieel voor het slagen van de processen voor het maken van zonnecellen. Maar Schlatmann wil er eigenlijk zo snel mogelijk vanaf. Op het moment dat nieuwe typen zonnecellen van het lab naar massaproductie gaan, is het gebruik van vacuüm vaak niet praktisch en duur. Bij de ontwikkeling van nieuwe typen zonnecellen is een hoge efficiëntie bij de omzetting van zonlicht van groot belang. Hierdoor kunnen nieuwe toepassingen ontwikkeld worden, zoals het splitsen van water voor de productie van waterstofgas. Dat gas kan dan worden gebruikt



Ron Heeren.



Dagvoorzitter Joost Frenken.

voor de synthese van brandstoffen, die fossiele energiebronnen kunnen vervangen. PVcomB doet onderzoek naar de productie op grote schaal van efficiëntere zonnecellen. Daarbij wordt vooral gekeken naar multi-junctie technologie gebaseerd op perovskieten. Deze zonnecellen kunnen door de verschillende lagen een groter deel van het spectrum van zonlicht omzetten. In juni krijgt het Helmholtz Zentrum een nieuwe machine, KOALA, voor het opschalen van de productie van deze cellen. Deze machine is voornamelijk gebaseerd op verschillende depositiemethoden in vacuüm.

Efficiënte optiek voor EUV

Efficiëntie is ook een van de hot topics bij de verdere ontwikkeling van optiek in het vacuüm van EUV-machines, die ons snel van veel meer nieuwe chips moeten voorzien. Marcelo Ackerman (Universiteit Twente) vertelde dat hierin geen lenzen en spiegels gebruikt kunnen worden, omdat EUV geabsorbeerd wordt door vrijwel alle materialen. Dit licht kan alleen gereflecteerd worden door enkele nanometers dunne roosters met verschillende lagen van afwisselend silicium en molybdeen. Deze lagen moeten natuurlijk tijdens het gebruik stabiel blijven en een levensduur hebben die even lang is als die van de machine. Ackerman onderzoekt het aanbrengen van diffusiebar-

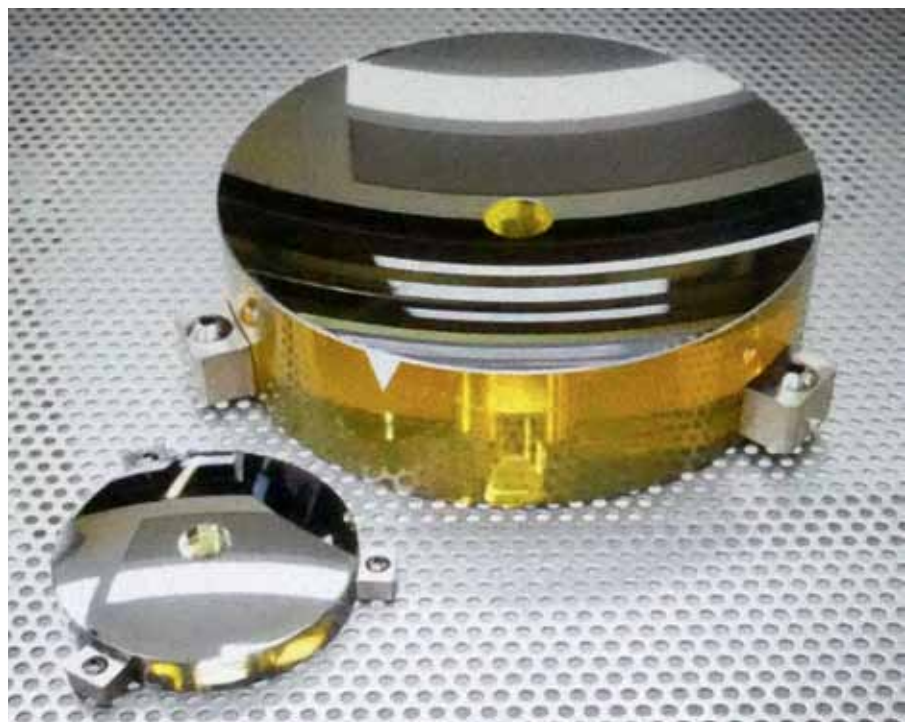
rières om te voorkomen dat de atomen zich naar andere lagen verplaatsen. Het doel is de reflectie-efficiëntie, nu 70%, nog met een paar procent te verhogen, waardoor de machine in zijn geheel twee keer beter gaat presteren. Er wordt ook al nagedacht over roosters voor de volgende generatie EUV-machines die gaat werken bij een golflengte van 6,6 nm. Daarvoor kunnen lagen van La(N)/B of B₄C gebruikt worden, met een theoretisch haalbare efficiëntie van 80%.

Sputteren van dunne metaallagen

Diederik Depla (Universiteit Gent) liet ons kennismaken met de wereld van de magnetron-sputteringstechniek voor het maken van dunne lagen van metalen. In het lab wordt die techniek toegepast bij een druk van ver onder de 10⁻⁴ Pa, maar voor industriële toepassingen zou de druk daar ver boven moeten liggen. Daarbij neemt het aantal verontreinigingen in de gesputterde filmlaag toe. De eigenschappen van de dunne lagen veranderen daardoor. Duidelijk is dat te zien aan de microstructuur van de lagen, in de afname van de grootte van de verschillende domeinen bij een groter aantal verontreinigingen. Deze structuurverandering blijkt vrijwel onafhankelijk te zijn van het soort gesputterde metaal-atomen. De inzichten kunnen gebruikt worden bij het aanpassen van de eigenschappen van gesputterde metaallagen.

NEVAC-prijs 2020

Door corona is de NEVAC-prijs 2020 pas in het najaar uitgereikt door penningmeester Ad Ettema aan de winnaar, Brian Baker (RUG). Het winnende artikel is in dit blad afgedrukt in het derde nummer van vorig jaar. Joost Frenken



De groep van Marcelo Ackerman werkt aan betere optiek voor EUV-machines.



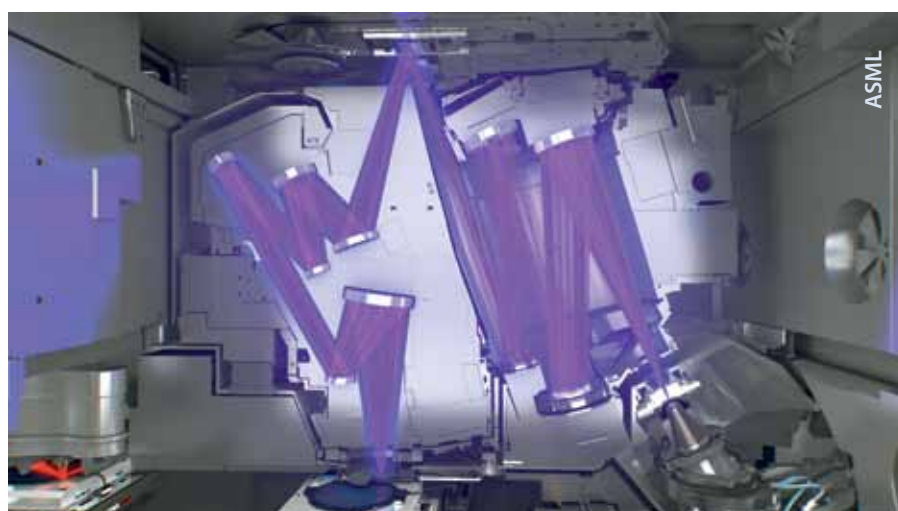
Intro van de pauzefilm.

feliciteerde nogmaals de winnaar, die vervolgens vertelde over zijn werk aan metaal-organische netwerkstructuren op een oppervlak van goudatomen.

In plaats van posters

In een online programma kun je creatief zijn en een postersessie omtoveren in flitspresentaties: korte maar krachtige filmpjes die het mogelijk maken in korte tijd kennis te maken met veel verschillende instituten en bedrijven. Duidelijk is dat vacuüm een grote rol speelt bij het onderzoek van TNO. Het instituut pakte flink uit met vier presentaties: Freek Molkenboer vertelde over CSI, een nieuwe faciliteit voor het kalibreren van instrumenten die in de ruimte gebruikt gaan worden; Andrey Ushakov over diagnostische systemen voor verontreinigingen in het plasma van de ITER tokamak; Jurjen Emmelkamp over het modelleren van het gedrag van ionen in een Electron Impact Ionizer voor een hoog-vacuüm RGA; en Herman Bekman over de rol van vacuüm en het tegengaan van verontreinigingen in bijvoorbeeld EUV-machines, onderzoek gedaan door TNO's nano-instrumentatie groep.

Twee onderzoekers van ARCNL kwamen aan het woord: Cristiane Stilhano Vilas Boas vertelde over het werk dat ze deed aan de Universiteit Twente aan de reactiekinetiek van overgangsmetalen die werden blootgesteld aan moleculair en atomair zuurstof; Georgios Araizi Ka-



Het hart van de NXE:3400 EUV-scanner, waarin een plasma ontstaat met waterstof.

noutas deed aan de Universiteit van Amsterdam onderzoek naar het beïnvloeden van de eigenschappen van LaCoO_3 / LaTiO_3 perovskiet heterostructuren; een soort spelen met LEGO, maar dan op de nanoschaal.

Het voordeel van online is dat ook mensen vanuit het verre buitenland een bijdrage konden leveren. Matthijs A. van Spronsen vertelde vanuit het Verenigd Koninkrijk, waar hij werkt bij de Diamond Light Source (een synchrotron), over zijn werk aan het verkennen van het grensvlak tussen een vaste stof en een vloeistof (TiO_2 - H_2O) in vacuüm, waarbij het water aan het grensvlak op ijs lijkt.

Tenslotte kregen we nog een kijkje bij twee bedrijven. Michael Corey gaf een rondleiding door Leybold Nederland, waarbij hij de laatste innovaties van pompen voor R&D-toepassingen liet zien, zoals de SCROLLVAC en de ECO-DRY 25 plus.

Scienta Omicron vertelde over de verschillende soorten instrumentatie die ze maken voor onderzoekstoepassingen, zoals Molecular Beam Epitaxy en Scanning Probe Microscopy en HAXPES.

Pauzefilm

Als pauzesurprise was er een prachtig filmpje te zien, gemaakt door de NEVAC in 1987, van het experiment met de Maagdenburger halve bollen. Prachtig om te zien hoe enkele spannen paarden eerst de haak van de kabel kapot trekken

en pas bij een latere poging gaan de bollen uit elkaar. Deze werden daarbij zodanig vervormd dat het experiment niet kon worden herhaald. Daar was de pers, die later in de middag kwam kijken, niet blij mee.

Plasma in EUV-machines

Gosse de Vries (ASML) opende het middagprogramma met zijn verhaal over het vacuüm in de EUV-machines. Het lithografische proces is de ingewikkeldste stap in de productie van moderne computerchips. Toch lukt het nog steeds om de wet van Moore te volgen: elke twee jaar een verdubbeling van het aantal transistoren van een chip. Omdat EUV-licht door elk materiaal wordt geabsorbeerd, moet er wel gewerkt worden in een vacuümomgeving. Maar dat heeft ook zijn nadelen. In vacuüm is het lastig te voorkomen dat er toch koolwaterstoffen aanwezig zijn. Onder invloed van EUV vallen die moleculen uit elkaar. De koolstofatomen die vrijkomen slaan neer op de spiegels, waardoor steeds meer EUV geabsorbeerd wordt, in plaats van gereflecteerd. Daarom wordt tegenwoordig waterstofgas toegevoegd aan het vacuüm. Hierdoor ontstaat een plasma, dat koolstofaanslag voorkomt. Ook het waterstofgas absorbeert EUV en het kan optische componenten aantasten. ASML onderzoekt met behulp van theorie en experimenten de processen die zich afspelen op atomaire schaal en vindt op deze manier

oplossingen voor machines met een langere levensduur, nog meer vermogen en kortere productietijd.

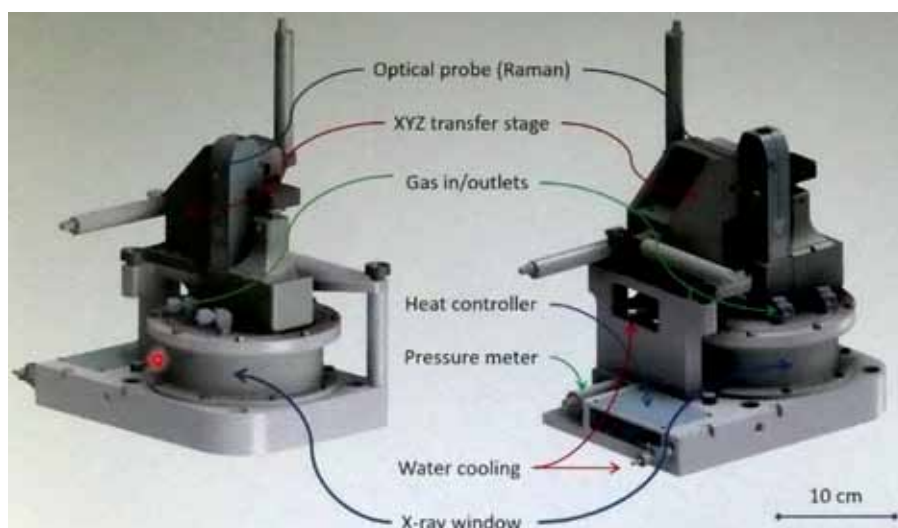
Vervormingen in wafers

Bij de productie van chips, die uit steeds kleinere structuren bestaan, is het van groot belang dat de wafers zeer nauwkeurig gepositioneerd kunnen worden. Bart Weber (ARCNL) onderzoekt de invloed van capillaire krachten op wrijving. Bij het lithografische proces wordt een wafer met een diameter van 30 cm geplaatst in een houder. Door wrijving tussen de houder en de wafer ontstaan er zeer kleine vervormingen in de toplaag van de wafer en de houder. Dat gaat ten koste van de precisie bij de positionering, die tot op de afmetingen van enkele atomen nauwkeurig moet gebeuren. Inzicht in de processen en krachten die op de nanoschaal een rol spelen tussen twee verschillende oppervlakken is daarom van cruciaal belang.

Eén atoom als katalysator

Met zoveel verschillende gasten in het buitenland vergroot je natuurlijk het risico dat bij een van de sprekers iets gebeurt, waardoor deze onaangekondigd uit beeld verdwijnt. Dat was het geval bij Mehdi Saedi in Teheran, die plotseling onvindbaar was toen hij op het programma stond. Gelukkig was Ulrike Diebold in Wenen bereid om haar verhaal eerder te vertellen.

Zij onderzoekt met een STM en andere technieken (in ultrahoog vacuüm) oppervlakken van metaaloxiden op atomaire schaal. Deze oxiden spelen een grote rol in energie-gerelateerde toepassingen. Als voorbeeld noemde ze onderzoek aan atomaire katalysatoren. Platina, palladium en rhodium worden in auto's gebruikt voor het omzetten van stikstofoxide, koolmonoxide en kleine koolwaterstoffen in stikstofgas, kooldioxide en water. Omdat deze metalen zo duur zijn, worden er tegenwoordig erg veel katalysatoren uit auto's gestolen. Een oplossing kan zijn om veel minder van deze dure metalen te gebruiken. Tenslotte werken



De LMCat-reactor voor het maken van grafeen op een oppervlak van vloeibaar koper.

alleen de atomen aan het oppervlak als katalysator. Daarom is het interessant katalysatoren te maken die bestaan uit enkele atomen. De vraag is dan wel of de eigenschappen daardoor veranderen. Helaas zijn enkele atomen thermisch niet stabiel op een eenkristal oppervlak, als de temperatuur oploopt, ontstaan er clusters van meerdere atomen. Toch is er een goed modelsysteem gevonden: een $\text{Fe}_3\text{O}_4(001)$ oppervlak, waarin enkele ijzeratomen aan het oppervlak ontbreken. Op die plaatsen kan een ander los metaalatoom worden aangebracht. Deze atomen gaan pas boven de 700 K samenklonteren. Maar na het toedienen van CO blijkt dat de losse platina atomen toch mobiel worden. Ze vormen tweetallen (dimeren) op het oppervlak. Het goede nieuws is dat de dimeren verder niet meer mobiel zijn. En het aantal dimeren op een oppervlak blijkt gerelateerd te zijn aan de geproduceerde hoeveelheid CO_2 uit CO. Dus misschien bestaat een katalysator in de toekomst niet uit enkele atomen van een edelmetaal, maar uit dimeren.

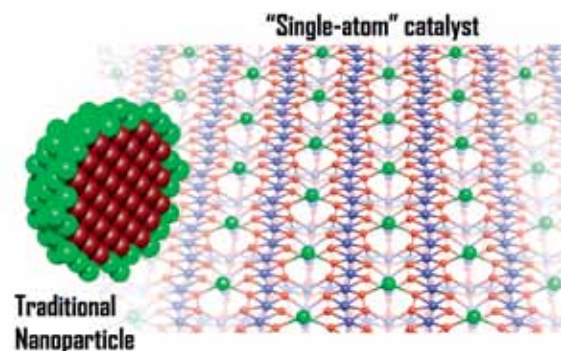
Grafeen maken op vloeibaar koper

Precies op tijd was er in Teheran weer elektriciteit en kon Mehdi Saedi alsnog zijn presentatie geven over werk van het LMCat consortium, dat hij samen met Irene Groot (Leiden) coördineert. Het doel daarvan is het vormen van tweedimensionale materialen, zoals grafeen, op

vloeibare metaalkatalysatoren met behulp van CVD. Het productieproces op de huidige manier heeft een lage productiesnelheid, het is duur en gebruikt veel energie. Bovendien gaat er veel katalysator verloren, ontstaat er chemisch afval, en de kwaliteit van het 2D-materiaal is laag. Door het gebruik van een vloeibaar metaal als katalysator kan het 2D-materiaal veel homogener gemaakt worden en gemakkelijker afgescheiden, zonder dat er verschillende domeinen ontstaan. Ook is er minder verlies van energie en katalysator. LMCat heeft voor dit proces een nieuwe reactor ontworpen, waarmee grafeen van goede kwaliteit gemaakt kan worden op het oppervlak van vloeibaar koper.

NEVAC 60 jaar en lab tour

Na de goedgevulde dag vol nieuwe wetenschap en technologie in vacuüm dankte de kersverse voorzitter van de NEVAC, Sense Jan van der Molen, het



Enkele atomen als katalysator.



Virtuele tour door de labs van ARCNL.

geslaagde werk van de organisatie en de sponsors die het borrelpakket verzorgden dat de deelnemers thuis bezorgd kregen. Ook vroeg hij alvast aandacht voor de NEVAC-dag van volgend jaar, woensdag 13 april 2022. Exact op die dag bestaat de NEVAC 60 jaar en dat wordt gevierd in Rijksmuseum Boerhaave in Leiden, in 2022 European City of Science.

Tot slot verzorgde ARCNL nog een virtuele lab tour, gefilmd, inclusief het geluid van alle pompen die de spreker tijdens zo'n rondleiding vaak onverstaaanbaar maken. Zodra het weer mogelijk is, gaat ARCNL de NEVAC uitnodigen voor een echt bezoek aan de labs in Amsterdam. Wat je natuurlijk mist bij een online symposium zijn de gesprekken in de

wandelgangen, het bewonderen van de nieuwe apparatuur en materialen van de bedrijfsleden en de gezelligheid van samen lunchen en borrelen. Dat kunnen we hopelijk volgend jaar dubbel en dwars inhalen!

Wie wordt onze penningmeester?



Recentelijk heeft onze penningmeester Ad Ettema besloten een stapje terug te zetten. Daarom zoeken we per direct een competente **penningmeester** (m/v) voor het NEVAC-bestuur.

Een positie als bestuurslid biedt je/u de kans om NEVAC mede te vormen en waar nodig te vernieuwen. De tijdsbelasting valt mee.

Wij willen in het bijzonder onze leden uit het bedrijfsleven aanmoedigen om te solliciteren.

Meer informatie is te verkrijgen via het bestuur, via voorzitter@nevac.nl



60 jaar NEVAC

woensdag 13 april 2022
Rijksmuseum Boerhaave
Leiden

meer info volgt op
www.nevac.nl



rijksmuseum
boerhaave

LEIDEN 2022
European City of Science

HAXPES: XPS met harde röntgenstralen zonder synchrotron

Röntgenfoto-elektronspectroscopie (XPS) is een krachtige oppervlaktegevoelige techniek waarmee eenvoudig en eenduidig chemische informatie van atomen op een oppervlak of in een dunne film kan worden gemeten (figuur 1). Alle elementen zenden onder invloed van röntgenstraling elektronen uit met specifieke emissielijnen waardoor elk element kan worden geïdentificeerd. Maar deze elektronen uit laagstgelegen energieniveaus (zoals 1s, 2s, 2p) zijn tevens gevoelig voor de chemische omgeving van het atoom dat het elektron emitteert. Hierdoor wordt ook informatie verkregen over de lading van het atoom, de valentie (oxidatietoestand), of de chemische omgeving.

Ad Ettema

De oppervlaktegevoeligheid van deze techniek maakt het daarom uitstekend geschikt voor katalysestudies waarbij enkele atomen op een oppervlak een chemische reactie ondergaan en waarbij de valentie verandert. Echter, deze oppervlaktegevoeligheid is weer een nadeel wanneer diepere lagen in een materiaal moeten worden onderzocht, zoals de stapeling van lagen in moderne halfgeleiderstructuren. Daarom is sinds lange tijd een kleine gemeenschap actief in XPS met harde röntgenstralen van 5 tot 15 keV (HAXPES).

Het voordeel van excitatie met harde röntgenstralen is dat de uitgezonden elektronen (foto-elektronen) een veel hogere kinetische energie (snelheid) hebben, minder snel verstrooien en makkelijker van dieper uit een materiaal kunnen worden gemeten. Om HAXPES als methode voor het analyseren van multilagen te kunnen gebruiken was men tot voor kort aangewezen op het gebruik van synchrotronstraling waarbij de fotonenergie kan worden ingesteld in het bereik van 1 tot 15 keV. Door het gebruik

van een röntgenbron met een vloeibare gallium anode kan zowel een hoge energie (9,25 keV) worden bereikt als een hoge intensiteit (ongeveer 1000× meer intensiteit ten opzichte van een vastestof-anode en vergelijkbaar met een *bending magnet*-station van een synchrotron). Dit heeft de weg geopend voor een systeem voor het gebruik van HAXPES voor elk laboratorium zonder synchrotronstraling.

Toepassingen liggen met name op het gebied van ontwikkeling van nieuwe materialen voor oplaadbare batterijen, multilaagstructuren voor halfgeleiders en andere dunne films en coatings.

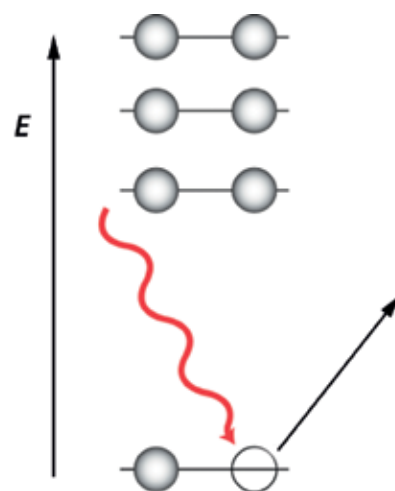
Foto-elektrondoorsnede

De interactiedoorsnede (*cross section*) van een röntgenfoton met een elektron uit een lage energietoestand is sterk afhankelijk van de energie. Dit heeft als gevolg dat er per foton minder elektronen worden uitgezonden naar mate de energie van het foton hoger wordt. Er is een grote interactiedoorsnede bij 1,5 keV (de röntgenstraling die vrijkomt van een alu-

minium anode) terwijl de interactiedoorsnede exponentieel afneemt bij toenemende röntgenenergie. Afhankelijk van de verschillende energietoestanden van elektronen van de verschillende elementen kan dit een factor 10 tot 1000 zijn. In figuur 2 zijn de interactiedoorsneden van enkele elektronen met lage energietoestanden van titaan (Ti) en zuurstof (O) uitgezet als functie van fotonenergie.

Vrije weglengte of ontsnapingsdiepte van foto-elektronen

De verminderde interactie bij hoge energieën tussen het foton en het elektron is ook van toepassing op de interactie tus-



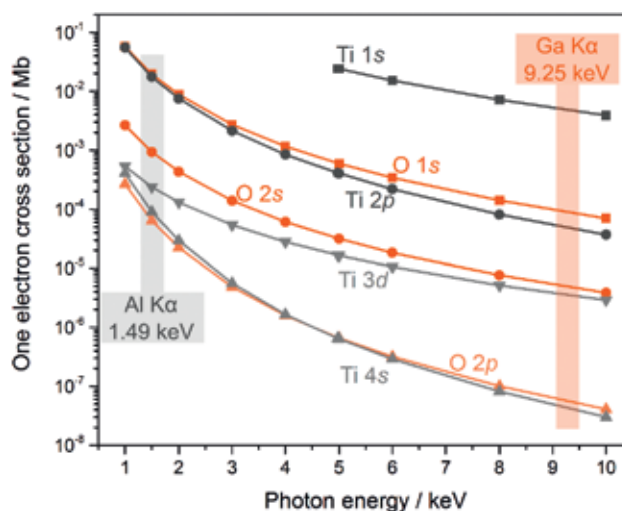
Figuur 1 In het foto-emissieproces van XPS wordt een röntgenfoton (rood) geabsorbeerd door een elektron uit een laaggelegen energieniveau (bijvoorbeeld 1s, 2s, 2p), dat zich gemiddeld het dichtst bij de kern bevindt. Het elektron verlaat daarna met hoge snelheid het monster. De som van kinetische energie van het elektron en de bindingsenergie van dit elektron in het atoom is gelijk aan de fotonenergie van het röntgenfoton. Hierdoor kan de bindingsenergie van een elektron worden bepaald en dat levert chemische informatie op over het atoom.

sen het uitgezonden foto-elektron en de atomen op het pad van dit elektron. Laag-energetische foto-elektronen hebben een hoge verstrooiingskans terwijl hoog-energetische foto-elektronen veel minder worden verstrooid. De interactiedoorsnede van vrije elektronen in materialen is het grootst in het gebied van 5-10 eV, daarboven neemt die exponentieel af. Dit heeft als gevolg dat bij 1,5 keV alleen foto-elektronen uit de bovenste 7 nm van een sample kunnen worden gedetecteerd waarbij de bijdrage van de eerste nanometers het sterkst is. Bij excitatie met 9,25 keV worden de foto-elektronen uit een laag van ongeveer 50 nm gemeten. In figuur 3 is de foto-elektronintensiteit uitgezet tegen de ontsnapingsdiepte van Si 2p-foto-elektronen, geëxciteerd met verschillende röntgen-energieën (afkomstig van verschillende röntgenanodematerialen). Dit maakt het mogelijk om niet-destructieve diepte-profielen te maken en de chemie van dunne films die niet aan de oppervlakte zijn te bestuderen.

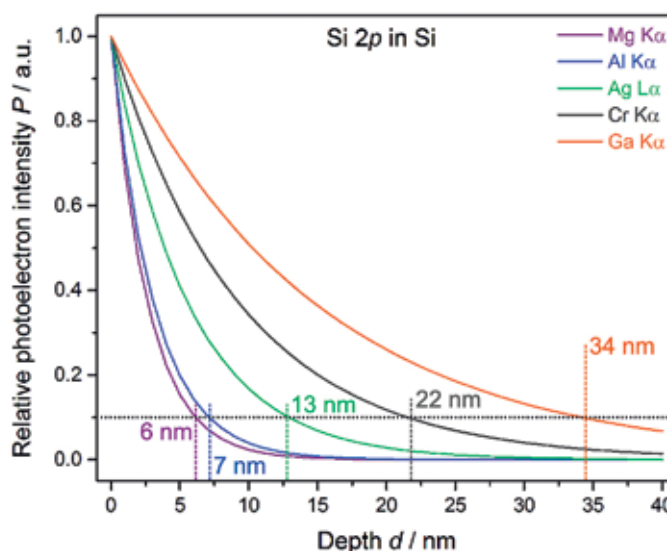
Röntgenanode

De röntgenstralen die nodig zijn om een kernelektron te emitteren worden gegenereerd in een röntgengenerator. In een röntgengenerator worden elektronen op een anode gestraald, waardoor uit vervalprocessen röntgenstralen ontstaan. Dit proces is precies het omgekeerde van het foto-emissieproces. Bij de röntgengenerator is het proces: elektron in en foton uit; terwijl bij foto-emissie het proces foton in en elektron uit is.

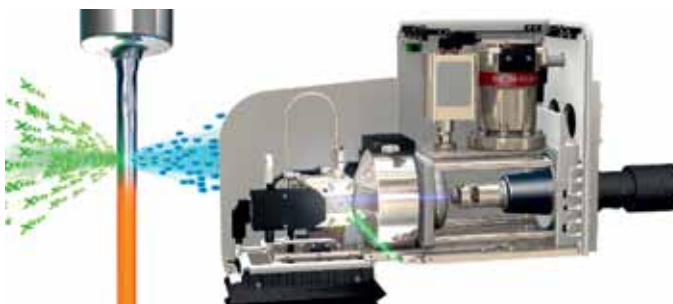
De elektronen die op de anode terechtkomen, dragen veel energie met zich mee die voor het grootste deel in warmte wordt omgezet (de röntgenfotonen vormen slechts een klein deel van de totale energie die op de anode terechtkomt). Daarom zijn vaste-stof-anodematerialen beperkt in de intensiteit van röntgenstralen die kunnen worden gegenereerd, vooral wanneer de grootte van het interactieoppervlak beperkt is. Aluminium heeft een lage bindingsenergie en een goede warmtegeleiding, waardoor dit



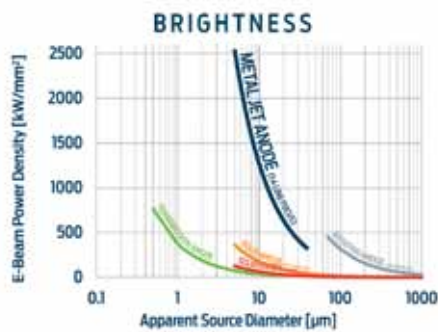
Figuur 2 De foto-emissiedoorsnede (*electron cross section*) neemt sterk af bij toenemende fotonenergie.



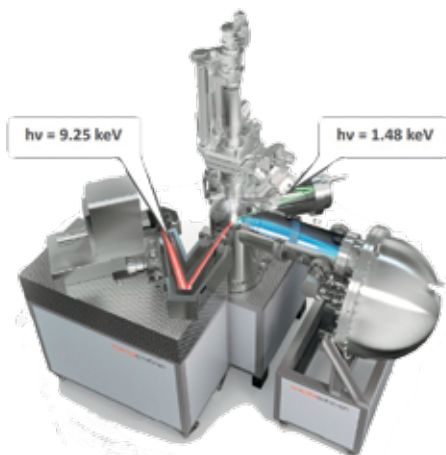
Figuur 3 De ontsnapingsdiepte van foto-elektronen neemt toe bij toenemende kinetische energie van het foto-elektron. Si 2p-foto-elektronen met verschillende excitatie-energieën hebben een toenemende ontsnapingsdiepte bij toenemende energie.



Figuur 4 De vloeibare galliumstraal-anode heeft een volume van 1 liter gallium dat continu wordt rondgepompt. Met een nozzle van 0,1 mm en een elektronenstraal van 70 keV wordt een hoge intensiteit van 9,25 keV fotonen gegenereerd.



Figuur 5 Het verschil in helderheid van verschillende röntgenanodes. De vloeibare galliumstraal-anode heeft 1000x meer intensiteit en helderheid dan een vaste-stof-anode.



Figuur 6 Het HAXPES-systeem, zoals ontwikkeld door Scienta Omicron. De rode bundel geeft de 9,25 keV fotonen weer die gereflecteerd, gefocusseerd en gemonochromatiseerd worden door een siliciumkristal. De blauwe bundel representeert de foto-elektronen die door de analysator worden gemeten. De groene bundel zijn de röntgenfotonen van een aluminium anode.

anodemateriaal zeer geschikt voor XPS is. De keuze voor inzet van vaste-stof-anodematerialen wordt met name be-

perkt als er meer intensiteit bij hogere energieën gewenst is. Een goede keuze is daarom een vloeibare gallumanode. Een vloeibare galliumstraal (smeltpunt 28 °C, en in een mengsel met indium beneden kamertemperatuur) wordt voortdurend ververst, waardoor de warmte snel wordt afgevoerd. Bovendien kan een vloeibare gallumanode niet smelten, want de anode is al in de vloeibare fase. In figuur 4 is een vloeibare gallumanode schematisch weergegeven. Een vloeibare galliumstraal wordt verkregen door een volume van 1 liter gallium voortdurend rond te pompen. Door een kleine nozzle ontstaat een straal met een diameter van 0,1 mm waarop een elektronenstraal met een energie van 70 keV wordt gefocusseerd. De röntgenstralen van het verval van het gat op het 1s-elektronenenergie-niveau hebben een energie van 9,25 keV. Het volume waarin deze röntgenfotonen worden gegenereerd is niet groter dan $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$. Op deze manier kunnen tot 1000x hogere intensiteiten worden gerealiseerd (figuur 5), precies wat nodig is om het verlies aan foto-elektrondoorsnede goed te maken.

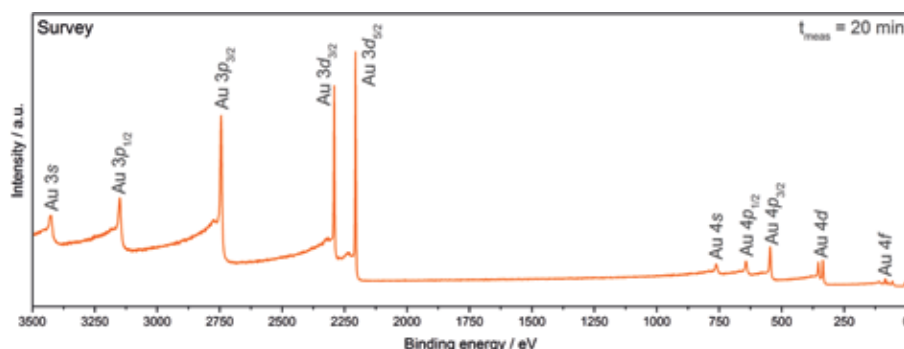
HAXPES-meetsysteem

Met een vloeibare gallumanode als röntgenbron, een goede monochromator en een hoge-energie elektronenanalysator kan een XPS-systeem worden gebouwd waarmee HAXPES-metingen verricht kunnen worden. In figuur 6 is een HAXPES-systeem weergegeven zoals deze is ontwikkeld door Scienta Omicron. De

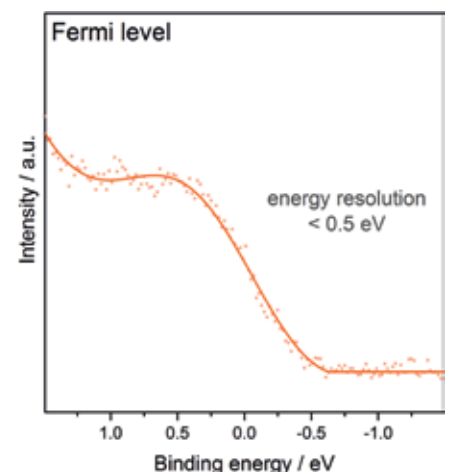
röntgengenerator op basis van de vloeibare galliumstraalanode staat geheel links. De harde röntgenstralen met een energie van 9,25 keV zijn in rood weergegeven en worden na emissie op een siliciumkristal gemonochromatiseerd en gefocusseerd op het monster in de meetkamer. De spotgrootte van de röntgen op het monster is ongeveer $30 \times 45 \mu\text{m}^2$. De hoogenergetische foto-elektronen (weergegeven in blauw) worden gemeten met een EW4000-elektronenspectrometer. Deze elektronenspectrometer heeft een grote hoeklens (60 graden) en is gebouwd om elektronen tot een energie van 12 keV te kunnen meten. Door de grote hoeklens van 60 graden is dit systeem ook zeer geschikt voor het doen van diepteprofielmetingen waarbij het hoekoplossend vermogen wordt gebruikt en spectra van 500 emissiehoeken beschikbaar zijn in een enkele meting.

De straal, aangegeven in het groen, is een traditionele monochromatische röntgenstraal van 1,5 keV afkomstig van een aluminium anode. Met de beschikbaarheid van twee röntgenbronnen kunnen metingen met de nieuwe galliumbron altijd worden gerelateerd aan de traditionele aluminiumbronmetingen.

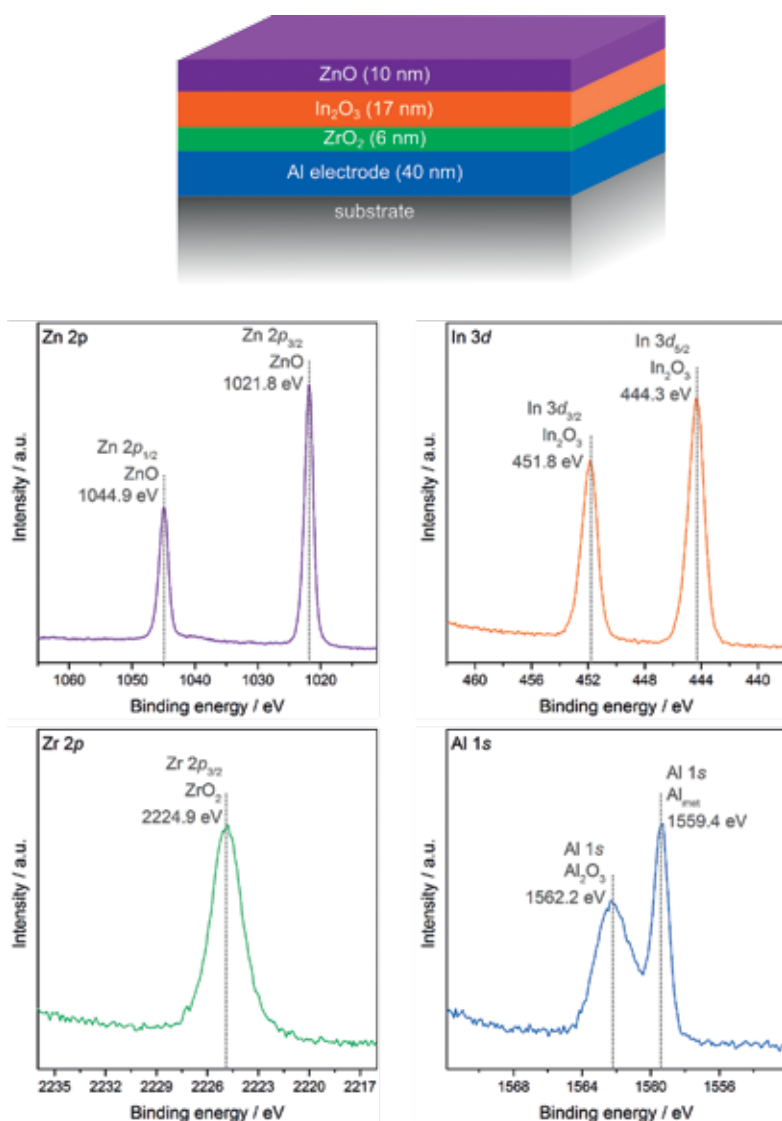
Het vacuümsysteem van de HAXPES-machine is bijzonder vanwege het feit dat het twee afzonderlijke systemen zijn. Vanwege de hoge dampdruk van gallium zou het volledige systeem snel veront-



Figuur 7 Een breed spectrum van 3500 eV van Au gemeten met stapgrootte van 0,1 eV in een tijd van 20 minuten. HAXPES toont niet alleen enkele laaggelegen elektronentoestanden, maar ook gehele elektronenschillen.



Figuur 8 Een spectrum van het Fermi-niveau van Au. De breedte van deze energiepiek is een goede indicatie voor de resolutie van het gehele meetsysteem.



Figuur 9 HAXPES-metingen aan een stapeling van lagen voor een metaaloxidetransistor. Alle lagen zijn goed te analyseren zonder destructieve sputtermethoden die de oorspronkelijke chemie kunnen verstoren.

reinigd zijn als de röntgenbron niet gescheiden zou zijn van de meetkamer. De Ga-röntgenbron heeft een aparte kamer die via een dun membraan verbonden is met de monochromator (het deel met de rode bundel in figuur 6). Beide kamers worden afgepompt met een kleine turbopomp van circa 70 l/s en heeft een typische druk van 10^{-6} mbar. De tafel met de Ga-bron en de monochromator heeft wielen en kan volledig worden gescheiden (!) van het meetsysteem terwijl deze nog onder vacuüm is of met de Al K alpha-bron (groene straal in figuur 6) wordt gebruikt. Er is dus een kleine ruimte tussen de bron en het meetsysteem dat bij installatie wel gefixeerd wordt. De uitlijning is namelijk extreem kritisch (op

hoogminuten). Het meetsysteem zelf heeft een typische druk van 10^{-10} mbar. Behalen van een hoog vacuüm nivo is voor de methode en voor de meeste monsters niet heel erg belangrijk vanwege de geringe oppervlaktegevoeligheid. HAXPES-experimenten kunnen zelfs gedaan worden bij relatief hoge drukken tot circa 25-100 mbar.

Metingen

De eerste vraag die opkomt bij het gebruik van HAXPES voor een onafhankelijk systeem betreft de resolutie. XPS met een hoogenergetische röntgenbron en een grote energiebreedte is zo goed als waardeloos omdat er geen enkele verschuiving van laaggelegen energie-

niveaus mee kan worden gemeten. Deze verschuivingen zijn juist de kracht van XPS. In figuren 7 en 8 is een aantal metingen van goudfolie (Au) weergegeven. De eerste meting betreft een breedspectrum over 3500 eV met een stapgrootte van 0,1 eV gemeten in ongeveer 20 minuten(!). Het bijzondere van dit spectrum is tevens dat niet alleen laaggelegen energieniveaus worden gemeten, maar complete elektronenschillen. In figuur 7 zijn alle elektronenniveaus met het quantumgetal $n = 3$ en $n = 4$ te zien.

Een tweede spectrum van Au (figuur 8) betreft de meting van het fermi-niveau. Dit spectrum geeft een zeer goed en betrouwbaar beeld van de totale systeemresolutie en meet de elektronen met de hoogste kinetische energie. De resolutie op deze manier gemeten komt op 0,5 eV, precies goed voor het meten van verschuivingen in laaggelegen energieniveaus.

Een tweede illustrerende meting (figuur 9) is die van een stapeling van lagen zoals voor de fabricage van metaaloxide-transistoren. Het betreft een silicium substraat met een elektrode van 40 nm Al (het metaal) met daarboven 6 nm ZrO₂, 17 nm In₂O₃ en 10 nm ZnO (de oxiden). De spectra van de metalen zijn alle goed te meten zonder lagen te hoeven verwijderen (bijvoorbeeld door sputteren). Zelfs van de Al laag kan eenduidig worden vastgesteld dat deze deels is geoxideerd, terwijl dit met geen enkele andere techniek zo kan worden bepaald.

Conclusies

Met HAXPES is een nieuwe ontwikkeling ingezet in XPS. De hoge intensiteit van de gallium röntgengenerator compenseert het verlies aan foto-emissie-doorsnede volledig, terwijl de verlaagde interactiedoorsnede van de foto-elektronen de dieptegevoeligheid van XPS sterk laat toenemen. De meettijden zijn kort vergeleken met traditionele Al Ka XPS en de resolutie is met 0,5 eV vergelijkbaar met gemonochromatiseerd Al Ka XPS. Met deze techniek is bijvoorbeeld in situ analyse van oplaadbare lithium batterijen eenvoudig geworden.

Stel je voor: Frans van Roosmalen

Stel jezelf ook eens voor aan andere NEVAC-leden. Beantwoord de onderstaande vragen en mail de antwoorden en een foto aan redactie@nevac.nl

Waar werk je en wat is je functie?

Ik ben werkzaam bij Hositrad Vacuum Technology, tegenwoordig als internationaal sales manager. Ik behandel op dit moment samen met Jurgen Tomassen, onze managing director, al onze sales. De vertegenwoordiger uit Duitsland en de toekomstige vertegenwoordiger Benelux vallen ook onder deze verantwoordelijkheid. Daarnaast ben ik onderdeel van het managementteam waarin we de lijnen uitzetten en huidige gang van zaken coördineren voor Hositrad. Een veelomvattende functie met veel uitdagingen en mooie contacten in binnen en buitenland.

Hoelang werk je daar en wat deed je daarvoor?

Ik ben begonnen in oktober 2004 als medewerker magazijn voor drie dagen naast mijn avondstudie. Ik kwam uit de horeca en was de onregelmatigheid zat. Ik ben meegegroeid met het bedrijf. We begonnen met zes personeelsleden en nu zijn we met negentien medewerkers. Ik ben van drie naar vijf dagen gegaan en van medewerker magazijn, logistiek manager, sales manager Benelux naar nu internationaal sales manager.

Welke opleiding(en) heb je gevolgd?

Ik heb mijn MEAO Bedrijfsinformatica afgerond en mijn propedeuse Communicatie en Journalistiek aan de HEAO in Utrecht. Ben in het bezit van mijn horecapapieren en ben in dat vakgebied ook leermeester. Als laatste heb ik de cursus Elementaire Vacuümtechniek afgerond aan de TU Delft bij Dick Langeveld. Volgens mij was dat in 2006.

Waarom ben je lid van de NEVAC?

Het is voor onze branche belangrijk dit soort initiatieven te ondersteunen en daarom zijn we aangesloten bij de NEVAC. Het is voor ons een goed platform om ons te presenteren en gezellig met de concullega's eenmaal per jaar bij te kletsen op de NEVAC-dag. Ook het contact met de onderzoekers en technici tijdens de door de NEVAC georganiseerde reizen is erg leuk en leerzaam.



Wanneer kwam je voor het eerst in aanraking met vacuümtechniek?

In het magazijn van Hositrad kwam ik voor het eerst in aanraking met vacuümtechniek. Ik heb altijd al affectie met techniek gehad en Hositrad wilde mij ook nog opleiden in de werkplaats dus dat was een fijne bijkomstigheid. Ik veel geleerd van onze oprichter Jaap Tomassen en andere collega's binnen Hositrad. Op de vacuüm cursus van de NEVAC heb ik de theorie geleerd en de praktijkkennis in de loop der jaren uitgebreid door ervaring op te doen met de producten die wij verkopen en de projecten van klanten. Het is een boeiende industrie met leuke mensen. Het internationale karakter draagt eraan bij dat ik me goed op mijn plek voel in de vacuümtechniek en bij Hositrad. Ik kijk ernaar uit weer naar de klanten in binnen en buitenland te mogen reizen en nieuwe ervaringen op te doen.

Op welke manier heeft je werk te maken met vacuümtechniek?

Mijn werk heeft alles te maken met vacuümtechniek. Hositrad doet niks anders. We krijgen veel vragen uit het veld. Wetenschappers en industriële klanten die op zoek zijn naar een oplossing voor hun vraagstuk. Het vacuüm is meestal een middel voor hun om een doel te bereiken en geen doel op zich. Door onze klanten te helpen met het vinden van oplossingen met betrekking tot vacuümtechniek, ontlasten we hen zodat zij zich op het resultaat van hun uiteindelijke doel kunnen focussen.

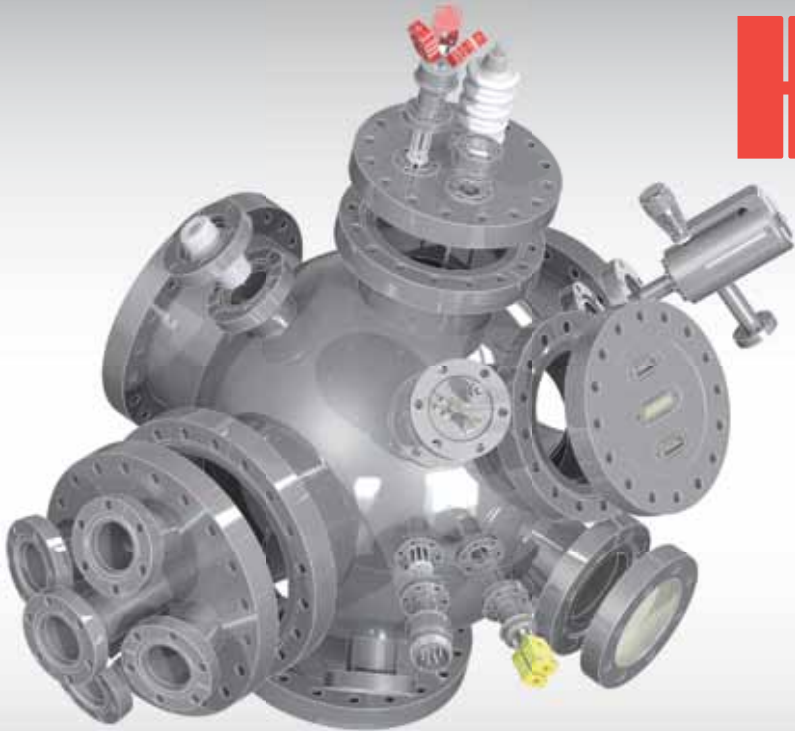
Wat vind je het mooiste dat je in je werk hebt meegeemaakt op het gebied van vacuümtechniek?

We werken in een bedrijfstak die bij veel mensen onbekend is, terwijl hun dagelijks leven vol zit met producten die onder vacuüm worden gemaakt en verbeterd. Het besef dat je in

een dynamische omgeving werkt in zeer veel verschillende bedrijfstakken. Die op hun beurt, samen met de wetenschap, aan de wieg staan van innovaties die ons dagelijks leven nog meer beïnvloeden, geeft een bepaalde kick.

Heb je eventueel suggesties voor wat de NEVAC kan betekenen voor de leden?

Ik heb eigenlijk geen suggesties. Zoals de dingen nu gaan vind ik het prima. Ik heb wel vaak op NEVAC-dagen gehoord dat de lezingen erg wetenschappelijk zijn. Maar goed, daar zit ook de meeste innovatie in. De meeste leden weten wat vacuüm inhoudt, dus om de leveranciers te laten vertellen wat ze doen is alleen voor nieuwkomers binnen de NEVAC misschien interessant. Daarvoor zijn de koffiepauzes en de lunch in mijn ogen toereikend. Mocht er een innovatie bij een van de leveranciers zijn, dan is dat wel interessant om ook te presenteren natuurlijk.



VACUUM TECHNOLOGY
Hositrad

**De Wel 44
3871MV Hoevelaken
+31(0)33-2537210**

**www.hositrad.nl
info@hositrad.nl**

YOUR EUROPEAN VACUUM SUPPLIER

CO₂ als grondstof voor synthetische kerosine

en het belang van plasma voor hergebruik van CO₂

Hergebruik van CO₂ is een essentieel aspect van het rondkrijgen van de koolstofkringloop en de oplossing van problemen zoals langdurige en grootschalige energieopslag en de integratie van hernieuwbare energie in de mobiliteitssector. In het DIFFER-instituut wordt onderzoek verricht naar nieuwe methoden om met hernieuwbare energie CO₂ om te zetten in brandstoffen.

Alex van de Steeg & Adelbert Goede

DIFFER (Dutch Institute for Fundamental Energy Research),
De Zaaie 20, 5612 AJ Eindhoven, www.differ.nl

Dit artikel beschrijft het onderzoek naar de vorming van synthetische kerosine uit CO₂, teruggewonnen uit de atmosfeer, onderwerp van het Europese Horizon 2020-project KEROGREEN [1]. De eerste stap, meteen een van de moeilijkste, is het omzetten van CO₂ naar CO, de bouwsteen voor brandstofsynthese via bekende processen. Plasma-activering is een veelbelovende methode om de endotherme CO₂ dissociatiereactie aan te drijven. Onderzoek binnen DIFFER richt zich op het begrijpen en verbeteren van

CO₂ splitsing in een plasma. Recente resultaten, verkregen via ramanverstrooiing, geven een duidelijk beeld van de belangrijkste processen die zich voordoen bij CO₂ plasmadissociatie.

Plasma-gedreven CO₂ dissociatie

Een plasma is een gedeeltelijk geïoniseerd gas, waarin zich naast normale gasdeeltjes ook vrije elektronen, ionen en radicalen (kortlevende, elektrisch neutrale, reactieve deeltjes) bevinden. De vrije elektronen ontvangen energie

van een elektromagnetisch veld, waarna de elektronen deze energie overdragen aan de zware deeltjes via botsingen. Veel soorten plasma zijn niet-evenwichts-systemen waarin verschillende deeltjes verschillende temperaturen hebben. Zo hebben de lichte elektronen normaliter een temperatuur van 10.000 K of meer. Bij de energieoverdracht van elektronen naar gasdeeltjes kunnen tevens verschillende vrijheidsgraden (rotaties, vibraties, elektronische toestanden) van de atomen of moleculen selectief aangeslagen worden, zodat verschillende vrijheidsgraden ook verschillende temperaturen kunnen hebben.

De selectieve excitatie van de trillingsniveaus van CO₂ kan zorgen voor een zeer efficiënte CO₂ dissociatie. Essentieel hierbij is dat de temperatuur van het gas zo laag mogelijk wordt gehouden, maar als dit proces werkt, kan CO₂ worden ontleed zonder extra warmteontwikkeling. In het tegenovergestelde geval wordt verwarming gebruikt om CO₂ te splitsen. In dit geval domineert 'ouderwetse' thermische chemie, maar dan bij



Figuur 1 Foto van een CO₂ microgolflasma in het DIFFER-lab.

temperaturen ver boven de 3000 K. Een veel voorkomende uitdaging om een hoog rendement te bereiken is de optimalisering van de verblijftijd in de reactor. Bij vibratiegedreven dissociatie is dit nodig om inherente gasopwarming te voorkomen en bij thermische dissociatie om terugreacties, waarbij CO_2 opnieuw gevormd wordt, te minimaliseren.

Het microgolflasma

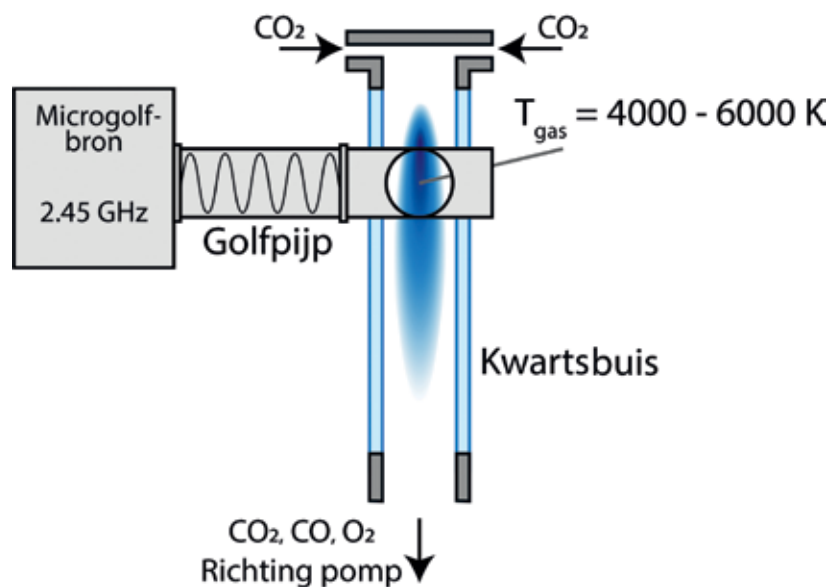
Het microgolflasma heeft historisch gezien de meeste aandacht gekregen voor de efficiënte splitsing van CO_2 in CO en O_2 . Dit is vooral te danken aan een reeks publicaties uit de Sovjet-Unie waarin energie-efficiënties van $> 80\%$ werden aangetoond. Deze veelbelovende resultaten werden toegeschreven aan dissociatie via de trillingsniveaus in het drukregime 100-200 mbar [2].

De Sovjet-microgolflasmaopstelling bestond uit ruwweg drie onderdelen:

1. een microgolflaser, oftewel een magnetron zoals thuis in de keuken;
2. golfpijpen om de microgolven van de bron naar het plasma te transporteren;
3. een kwartsbuis waarin het plasma zich bevindt en de microgolven geabsorbeerd worden.

CO_2 gas wordt tangentieel in de glazen buis geïnjecteerd, dit vormt een tornado-achtig stromingsprofiel met een snel ronddraaiende gasstroom langs de buitenkant van de buis. Dit beschermt de glazen buis tegen oververhitting. Na het plasma worden CO_2 en producten vervoerd naar een vacuümpomp. Hiervoor worden gewoonlijk droogpompen gebruikt bij een procesdruk van 50-200 mbar, al zijn er ook experimenten bij (veel) lagere of juist atmosferische druk uitgevoerd. Voor opschaling naar grotere en krachtigere systemen zullen hoogstwaarschijnlijk rootsblowers gebruikt worden. Figuur 1 toont een foto van het CO_2 microgolflasma en figuur 2 bevat een schematische weergave van de vacuüm- en microgolfofstelling.

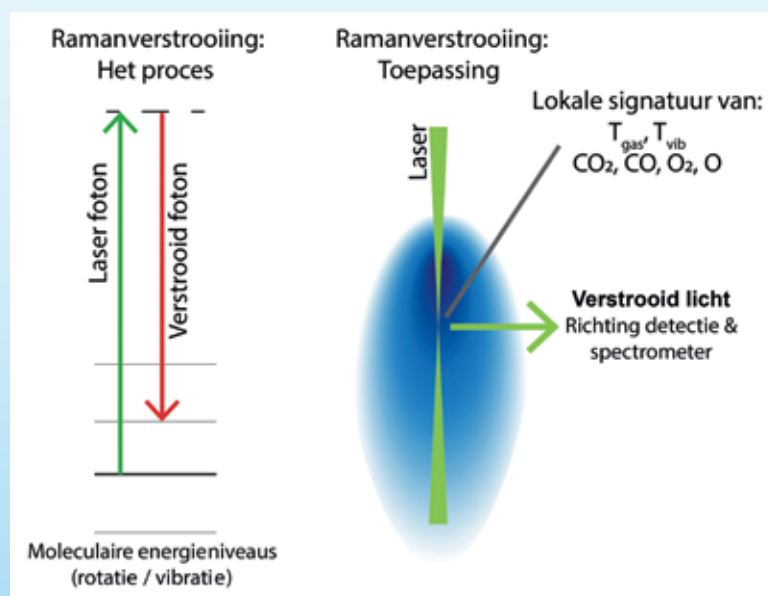
De huidige studies van dit type plasma, die het oorspronkelijke Sovjet-ontwerp



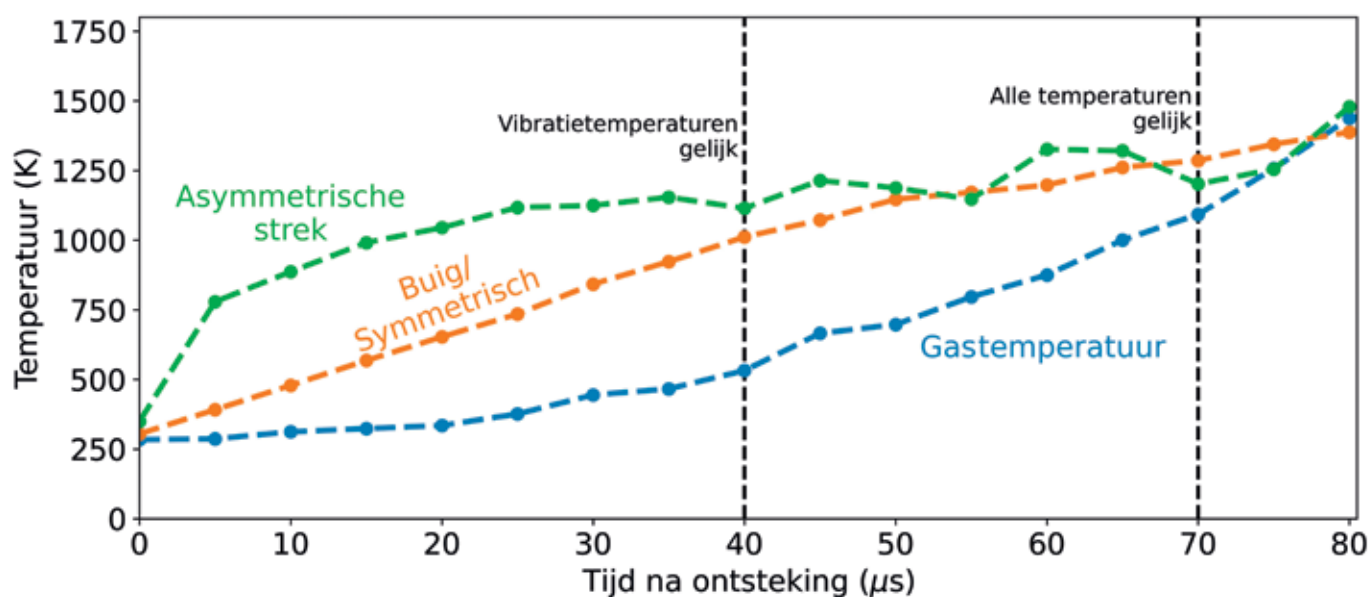
Figuur 2 Schematische weergave van microgolf- en vacuümpstelling voor een CO_2 microgolflasma.

Ramanverstrooiing om in het plasma te kijken

Ramanverstrooiing is de inelastische verstrooiing van licht op moleculen (of sommige atomen). Bij de interactie van de fotonen en de gasdeeltjes wordt energie uitgewisseld, zodat de fotonen energie ontvangen van de moleculen of omgekeerd. Door deze uitwisseling van energie krijgen de verstrooide fotonen een signatuur van de deeltjes waarmee ze in wisselwerking zijn geweest. Spectrale analyse van deze fotonen levert informatie op over welk type en hoe warm deze deeltjes waren en of deze deeltjes vibratie-excitatie-energie hadden. Dit is schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 Links: schematische weergave van ramanverstrooiing. De laser geeft in deze situatie een deel van de energie af aan het molecuul en het verstrooide foton heeft dus minder energie dan de laserfotonen. Rechts: Ramanverstrooiing in het plasma: Een laserpuls wordt gefocuseerd in het plasma, het verstrooide licht uit het brandpunt wordt, onder een 90 hoek, opgevangen door een spectrometer.



Figuur 4 Verloop in de tijd van de verschillende vibratie- en gastemperaturen na ontsteking van het CO₂ microgolflasma op 25 mbar met 800 W piekvermogen. Data uit onze eerdere publicatie [4].

zo dicht mogelijk hebben gevolgd (er zijn niet veel experimentele details beschikbaar), leveren een maximaal energierendement op van om en nabij de 50%. Duidelijk minder dan 80%, maar uit deze studies blijkt dan ook dat de gastemperaturen in de huidige reactoren hoger zijn dan 6000 K. Bij deze temperaturen, hoger dan het oppervlak van de zon, werkt het ladder-klimmechanisme niet, de gastemperatuur moet immers laag zijn. In plaats daarvan zorgt de thermische chemie voor de dissociatie van het CO₂. Om te onderzoeken of vibratie-gedreven chemie alsnog voor dissociatie kan zorgen, zoals beweerd door de Sovjets, of dat thermische chemie onvermijdelijk is voor het bereiken van een hoog rendement in dit type reactor, gebruiken we ramanverstrooiing om lokaal temperaturen en dichtheden van de reactieproducten te meten en uiteindelijk de reactor te optimaliseren.

Vibraties en dissociatie, hoe werkt dat?

Dissociatie van een molecuul door vibraties werkt door stapsgewijze excitatie en aggregatie van kleine hoeveelheden energie in de trillingsniveaus. De lichte plasma-elektronen exciteren CO₂ van de grondtoestand naar de eerste aangeslagen niveaus, als een klepel die een

klok luidt. Deze aangeslagen moleculen komen vervolgens met elkaar in botsing en voegen hun energie samen, waardoor boventonen ontstaan. Dit komt omdat het thermodynamisch voordeliger is om één molecuul met veel vibratie-energie te hebben dan veel moleculen met weinig. Als dit lang genoeg zo doorgaat bereikt het CO₂ molecuul een dermate hoog trillingsniveau dat de afstand tussen de atomen te groot wordt en de binding wordt verbroken, de klok breekt bij het laatste tikje. Om dit op grote schaal toe te passen is een lage gastemperatuur van cruciaal belang, aangezien dit het verlies van trillingsenergie aan warmte beperkt, verliezen die exponentieel toenemen naarmate de gastemperatuur hoger is.

Het is bewezen dat het vibratie-dissociatiemechanisme werkt voor N₂ en CO moleculen [3], dus wat maakt CO₂ dan speciaal? Dat zit erin dat het CO₂ molecuul drie atomen heeft, en dus meer vrijheidsgraden bezit dan stikstof of CO. In plaats van één trillingsmode heeft CO₂ er drie. Het molecuul kan symmetrisch strekken (de O-atomen 'strekken' tegelijk weg van de C), buigen (de O-atomen buigen t.o.v. het C-atoom) en asymmetrisch strekken (de O-atomen strekken uit fase in tegengestelde richting van C). Voor dissociatie moet de asymmetrische strekvibratie aangeslagen worden, de

andere vibratiemodi zijn namelijk sterk gekoppeld en lekken snel energie naar warmte. Maar, de asymmetrische strekmodus kan ook energie lekken naar de symmetrische strek- en buigmodi, iets wat bij N₂ en CO niet kan omdat er maar een trillingsmodus is.

Vibratiedissociatie, mythe of niet?

Om te onderzoeken hoe snel CO₂ energie uit vibraties verliest bekijken we een gepulseerd plasma met laserstrooiing. Het idee achter pulseren, of het herhaaldelijk aan- en uitschakelen van het plasma, is dat het plasma begint bij kamertemperatuur, waarbij de verliezen aan warmte minimaal zijn. De druk is 25 mbar in deze experimenten en het plasma staat gedurende 200 μs aan en uit gedurende 33 ms.

Figuur 4 bevat het belangrijkste resultaat van dit onderzoek. Hier zien we het verloop van de gastemperatuur en de vibratietemperaturen met een opsplitsing tussen de temperatuur van de asymmetrische strekvibratie en de overige modi. Veelbelovend is dat we aanvankelijk een sterke stijging zien van de asymmetrische strekvibratie, van 300 K naar 1100 K, maar na enkele microseconden beginnen ook de temperaturen van de symmetrische strek- en buigmodi te stijgen. Logisch gevolg is dat daarna

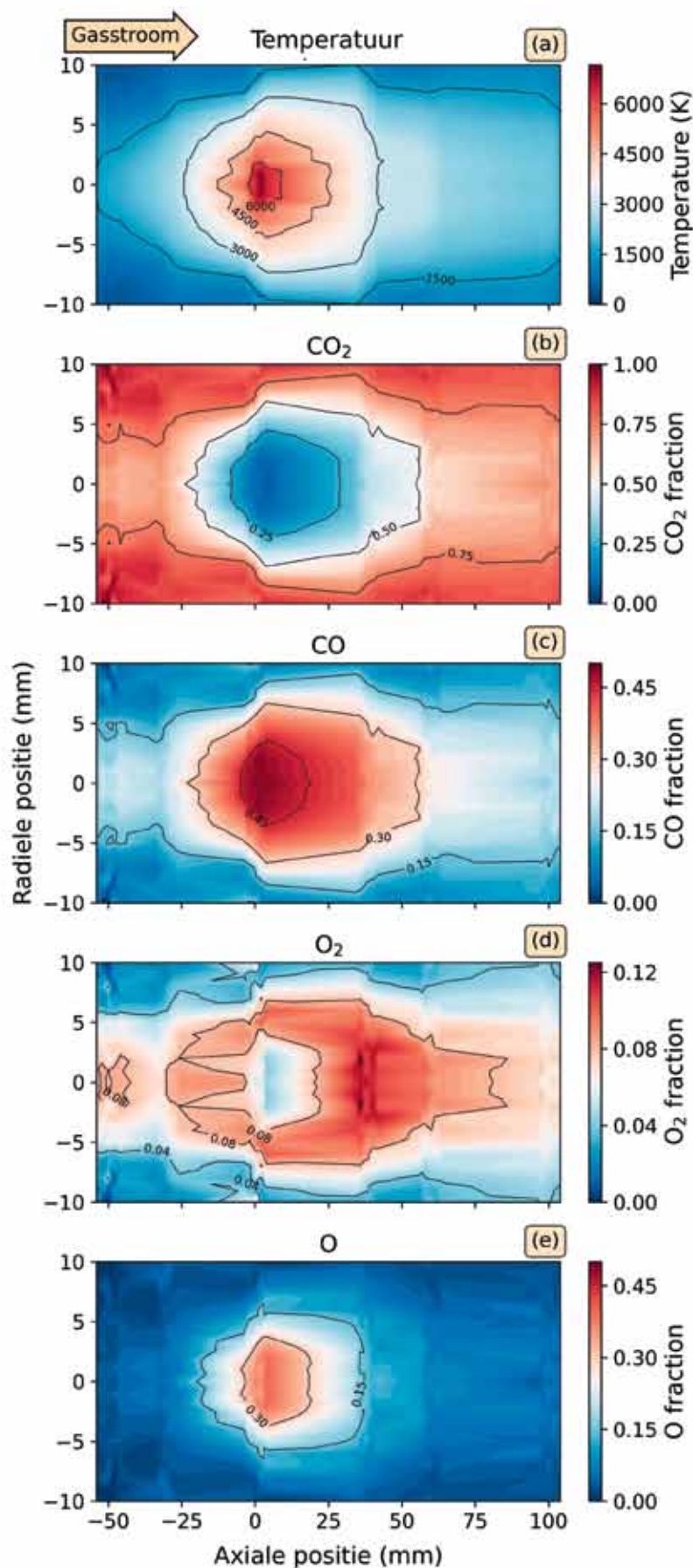
de gastemperatuur stijgt, na 70 μs is de gastemperatuur al gelijk aan de verschillende vibratietemperaturen.

Dit betekent dat in een fractie van een seconde de verschillende vrijheidsgraden van CO_2 dezelfde temperatuur hebben, maar dat in het allereerste deel van de puls er een mogelijkheid zou zijn om de vibratie-excitatie uit te buiten. Deze tijdsschaal is vooralsnog te kort om praktisch te benutten. Oplossingen voor het verlengen van deze tijdsschaal zijn de gastemperatuur actief verlagen door het plasma te ontsteken in een supersonische expansie, of door plasma uit de vergelijking te halen en infrarood licht te gebruiken om de vibratieniveaus aan te slaan. Hiermee wordt namelijk intrinsiek excitatie van andere vrijheidsgraden voorkomen. Beide technieken worden binnen DIFFER onderzocht, maar vooralsnog blijft het onduidelijk of vibratiekinetiek een rol van betekenis kan spelen in CO_2 conversie.

Hoge efficiëntie met thermische chemie

Plasma kan buiten de vibraties om CO_2 alsnog efficiënt ontleden en wel via thermische chemie. Simpel gezegd, het verhogen van de gastemperatuur boven de 3000 K zorgt ervoor dat CO_2 uit elkaar valt in CO en O. De maximale efficiëntie waarmee dit kan is thermodynamisch gezien 70% [5], er gaat namelijk inherent een deel van de energie verloren aan verhitting in plaats van chemie. In het berekenen van deze waarde is een cruciale rol weggelegd voor het zuurstofatoom in het pad van de plasmakern naar de pomp. Dit atoom kan namelijk, met een minimale energie-investering, een extra CO_2 molecuul ontleden om CO en O_2 te vormen. Een andere route voor de zuurstofatomen is recombinatie naar CO_2 , iets wat uiteraard voorkomen moet worden omdat dit de efficiëntie verlaagt.

Ramanlaserverstrooiing wordt ook in deze onderzoekslijn uitvoerig gebruikt en wel voor het maken van tweedimensionale plattegronden van temperatuur en deeltjesdichtheden. Figuur 5 toont deze



Figuur 5 Resultaten van ramanverstrooiing in een 120 mbar, 1000 W, 10 l/min CO_2 plasma. Van boven naar beneden: Gastemperatuur, CO_2 fractie, CO fractie, O_2 fractie en O fractie. Cilindrische symmetrie is verondersteld. Microgoven worden op $x = 0$ ingekoppeld en $y = 0$ is het centrum van de kwartsbuis. Gas stroomt van links naar rechts.

plattegronden voor een 120 mbar, 1 kW plasma met 10 l/min gasinput van CO₂ op kamertemperatuur.

De plasmakern heeft een temperatuur van 6000 K waarin nagenoeg al het CO₂ uit elkaar is gevallen in CO en O. Buiten de kern neemt de temperatuur snel af richting 3000 K, waar de zuurstofatomen ook in concentratie afnemen. Verder richting de pomp koelt het gas nog verder af en blijft er een mix van CO₂, CO en O₂ over.

Er zijn duidelijk twee zones waar chemie plaatsvindt. De kern, waar CO en O gemaakt worden, en een zone daarbuiten waar O verloren gaat en O₂ gemaakt wordt. Een analyse van de verschillende chemische reacties, gebaseerd op bovenstaande metingen, laat zien dat O voor namelijk verloren gaat in de reactie met CO₂, waar CO en O₂ gemaakt worden. Tevens blijkt er weinig ruimte te zijn voor recombinatiereacties waarin CO₂ opnieuw gevormd wordt. Het uitbuiten van de twee zones is precies waar de sleutel ligt om de efficiëntie verder te verhogen, het is namelijk niet alleen mogelijk

om geproduceerd CO te behouden in het pad van kern naar de pomp, er is zelfs ruimte om de dissociatiegraad aanzienlijk te verhogen middels de O-atomen. Hiervoor is zorgvuldig design van de reactor noodzakelijk en zijn metingen als deze, waarmee de chemie lokaal bepaald wordt, onontbeerlijk.

Conclusie

Plasmatechnologie voor CO₂ ontleding staat nog in de kinderschoenen, maar maakt wel grote stappen naar volwassenheid. Nieuwe inzichten naar de mogelijkheden en limieten van vibratie-gedreven dissociatie laten zien dat een puur plasmaproces te korte tijdsschalen heeft om vibratiekinetiek uit te buiten. Nieuwe innovaties om verhitting te voorkomen zijn noodzakelijk voordat hier grote stappen kunnen worden gezet.

Daarentegen biedt de thermische dissociatie in het continue plasma wel perspectief. Laserverstrooiing laat duidelijk zien dat een ruimtelijke verdeling in dissociatie- en recombinatiezones, met nadruk op de zuurstofatomen, kansen biedt

om de efficiëntie te verhogen. Snel transport van CO en O uit de plasmakern naar delen van de reactor met CO₂ present, kunnen zorgen voor extra dissociatie middels de O-atomen. Deze splitsing in twee dissociatiezones zou de thermodynamische limiet van 70% binnen bereik kunnen brengen.

Referenties

- 1 A.P.H. Goede, M. Tsampas, S. Er, R. Dittmeyer, P. Pfeiffer, A. Patyk, V. Middelkoop, S. Labonnote-Weber, L. Roses, E. de Wit, T. Böltken, A. Alekseev, M. van Dijk, M.C.M. van de Sanden, W. Bongers, B. Elzendoorn, P. Diomedé, and E. Langereis, in *12th International Symposium Hydrogen & Energy* (2018), p. 14.
- 2 A. Fridman, *Plasma Chemistry*, 1st ed. Cambridge University Press (2008).
- 3 M. Capitelli, G. Colonna, G. D'Ammando, V. Laporta, and A. Laricchiuta, *Chem. Phys.* **438**, 31-36 (2014).
- 4 A. van de Steeg, T. Butterworth, D. van den Bekerom, A. Silva, R. van de Sanden, and G. van Rooij, *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**, (2020).
- 5 A. J. J. Wolf, F. J. J. Peeters, P. W. C. Groen, W. A. Bongers, and M. C. M. Van De Sanden, *J. Phys. Chem. C* **124**, 16806-16819 (2020).

Gezocht:

Hoofdredacteur en redactieleden voor het NEVAC blad

Het doel van het NEVAC blad is uitwisseling van informatie tussen wetenschappers, technici en bedrijven binnen de vacuümtechniek in Nederland. Het verschijnt drie keer per jaar. De huidige hoofdredacteur, Hans van Eck (DIFFER), stopt na acht jaar als hoofdredacteur en daarom zoekt de vereniging nu een opvolger.

Taken:

- Richting geven aan de inhoud en vorm van het NEVAC blad, ideeën en contacten aandragen voor nieuwe artikelen
- Mede-redigeren van binnenkomende teksten
- Jaarlijks de jury samenstellen voor de beoordeling van inzendingen voor de NEVAC-prijs (en daar zelf ook aan deelnemen)

De inzet is gemiddeld een dag per maand.

Het NEVAC blad kan ook versterking gebruiken van gewone redactieleden die ideeën en contacten aandragen voor artikelen en deze artikelen redigeren.

Heeft u interesse in het leveren van een bijdrage aan het NEVAC blad als (hoofd)redacteur, stuur dan een mail aan redactie@nevac.nl

De hoofdredacteur en redactieleden worden benoemd door het bestuur van de NEVAC.

Wilt u meer informatie, neem dan contact op met Hans van Eck, H.J.N.vanEck@diff.nl



Agenda

27-30 juni 2021
ALD-ALE 2021
Tampa, Florida, VS

5-9 juli 2021
33rd International Vacuum Nanoelectronics Conference, Lyon, Frankrijk, online

23 september 2021
VCCN Minisymposium Product Cleanliness
High Tech Campus Eindhoven

11-14 oktober 2021
VASSCAA-10 & CVS 2021
Shanghai, China

24-29 oktober 2021
AVS 67th International Symposium & Exhibition
Charlotte, North Carolina, VS

10-11 november 2021
Precisiebeurs
Koningshof, Veldhoven

16-18 november 2021
Space Tech Expo Europe
Bremen, Duitsland

21-26 november 2021
EVC 16
16th European Vacuum Conference
Marseille, Frankrijk

1-3 december 2021
Tokyo Vacuum Show
Tokyo, Japan

7-8 december 2021
Reactive Sputter Deposition Conference
Leipzig, Duitsland

25-26 januari 2022
Physics@Veldhoven
Koningshof, Veldhoven

13 april 2022
60 jaar NEVAC
Rijksmuseum Boerhaave, Leiden

Links naar websites: zie de agenda op www.nevac.nl

PFEIFFER  **VACUUM**

The new dry pump
by Pfeiffer Vacuum



HiScroll®

The extremely quiet, compact, oil-free pump. To reduce your carbon footprint.

- | | |
|--------------------|--|
| Dry | Ideal backing pump for low final pressures. Free of grease, oils and hydrocarbons. |
| Sustainable | 15% higher efficiency, less heat generation and lower cooling requirements. |
| Quiet | Low noise emission, low vibrations, self-regulating cooling. |
| Intelligent | Adapted performance through intelligent use of sensor technology. |

We drive sustainable solutions.

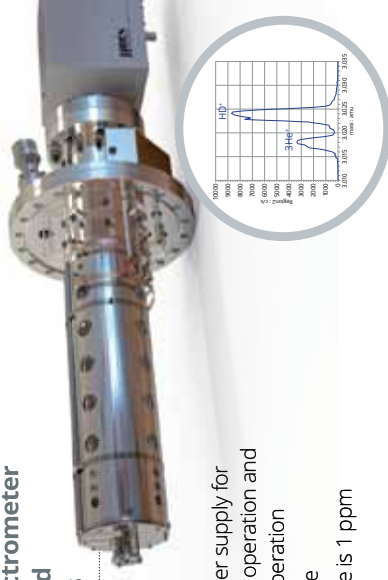
Are you looking for a perfect vacuum solution? Please contact us:
Pfeiffer Vacuum Benelux B.V. · T +31 345 478 400 · office@pfeiffer-vacuum.nl · www.pfeiffer-vacuum.com



Mass Spectrometers for Fusion Research DLS Series

DLS-20 Unique dual-zone switching ultra-high resolution mass spectrometer for the analysis of hydrogen and helium isotopes and light gases

- ▶ Industry first 20 mm rod diameter quadrupole mass filter for ultra-high mass resolution
- ▶ Software switchable dual-zone RF power supply for Zone H ultra-high resolution 1-20 amu operation and Zone L ultra-high stability 1-200 amu operation
- ▶ 0.006 amu mass separation in real time
- ▶ Sensitivity of both He in D₂ and D₂ in He is 1 ppm
- ▶ ³He quantification in HD



DLS-10 Mass spectrometer specifically developed for the research and quantification of light gases and hydrogen isotopes by mass

- ▶ 1-10 amu mass range
- ▶ Zone H ultra-high resolution operation for the separation and quantification of hydrogen and helium isotopes
- ▶ Sensitivity of both He in D₂ and D₂ in He is 10 ppm



DLS-1 Mass spectrometer for real-time quantitative analysis of complex gas and vapour mixtures in fusion applications

- ▶ 1-100 amu mass range
- ▶ Software driven recipes using threshold ionisation mass spectrometry (TIMS) for the real-time quantification of hydrogen and helium isotopes and deuterated hydrocarbons
- ▶ Sensitivity of D₂ in He of 100 ppm



Hidden Analytical Ltd, 420 Europa Boulevard,
Warrington WA5 7UN

T +44 [0] 1925 445 225 **F** +44 [0] 1925 416 518

HIDEN
ANALYTICAL