

NEVAC

jaargang 63 nummer 1 april 2025



NEDERLANDSE
VACUÛMVERENIGING

blad

Plasma-geassisteerde
atoomlaagdepositie

Europese studie TNO:
Vervanging PFAS in semicon

NEVAC-dag 2025
vrijdag 6 juni
op Universiteit Twente



Verenigingsgegevens

Ereleden

L.G.J.M. Hassink
† G. Ikkink
† Prof.dr. J. Kistemaker
† Ir. J.H. Makkink
Th. Mulder
Dr.ir. E.P.Th.M. Suurmeijer
Prof. dr. J.F. van der Veen
Dr.ir. J. Verhoeven

Bestuur

Freek Molkenboer, voorzitter
Sense Jan van der Molen, vicevoorzitter
René Erkelens, penningmeester
Pieter Heidema, secretaris

Verenigingssecretariaat

Pieter Heidema
secretaris@nevac.nl

Ledenadministratie

René Erkelens
penningmeester@nevac.nl

Penningmeester NEVAC

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

Contributies

Contributie € 30,- per jaar
Studenten/promovendi € 5,- per jaar
Bedrijfsleden € 175,- per jaar

Inlichtingen over opleidingen en examens

Dr. Gesa Welker
g.welker@gmx.net

Vacuümboeken uitgegeven onder
auspiciën van de NEVAC:



Terug van weggeweest

Groot was mijn verbazing toen Sense Jan van der Molen vroeg of ik de redactie van het NEVAC blad wilde aanvullen. De goede herinneringen die ik daaraan had, hebben me aangezet om serieus over de vraag na te denken. En ja, het is een leuke nieuwe uitdaging.

Ergens rond 1980 werd ik lid van de NEVAC, aangezien de vereniging een sterke basis had in AMOLF (FOM Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica), waar ik van 1972 tot 1999 heb gewerkt.

Van 1990 tot 1996 was ik (vice)voorzitter van de NEVAC.

In die periode organiseerde de NEVAC, onder auspiciën van IUVSTA, in 1992 het grote vacuümcongres IVC-12 en ICSS-8 in Den Haag. Ik was erbij betrokken als general editor van de proceedings. Met 1.200 deelnemers was het een formidabele uitdaging voor de NEVAC. Het werd een groot succes. Vervolgens ben ik nog actief betrokken geweest bij de IVC-congressen in Yokohama en Birmingham. Daarna heb ik mijn NEVAC-activiteiten afgesloten; uiteraard ben ik altijd lid gebleven. Ook ben ik zeer actief geweest in de Nederlandse Natuurkundige Vereniging. Het is goed dat de twee verenigingen de onderlinge banden aanhalen.

Ik vind het geweldig dat een kleine vereniging als de NEVAC altijd een heel goed blad in de lucht heeft weten te houden. Er is dus voldoende animo om de verschillende achtergronden van de leden te verbinden: vacuümtechniek, research- en productie-instrumenten, en natuurkunde. Hoewel we dertig jaar geleden vaak zeiden dat vacuüm 'af' was, gaat de ontwikkeling van pompen en vacuümdetectieapparatuur almaar verder omdat vacuüm steeds meer wordt toegepast. Dat EUVL-machines van ASML nu onder vacuüm werken, is een enorme boost voor de sector. Andere vacuümsystemen kunnen kilometerslang zijn. Vacuümfirma's zijn belangrijke spelers, evenals de grote afnemers van hun producten. Instrumentatie leunt eveneens steeds meer op vacuüm; denk aan (elektronen)microscopie en massaspectrometrie. Tenslotte zijn in de academische natuurkunde oppervlakken in (U)HV essentieel in bijvoorbeeld halfgeleideronderzoek, bij graffen en voor katalyse.

De drie NEVAC-richtingen zijn goed vertegenwoordigd en worden goed gemengd in het blad. Ook verslapt de aandacht voor de personen in het veld niet. Ik wil erg graag meewerken om dat zo te houden. Daarnaast is het een interessant experiment om een gepensioneerde in te zetten bij het blad. Gepensioneerden zouden toch iets meer tijd moeten hebben om een prachtig blad in de lucht te houden. Ik zie uit naar een goede samenwerking met mijn collega-redactieleden.

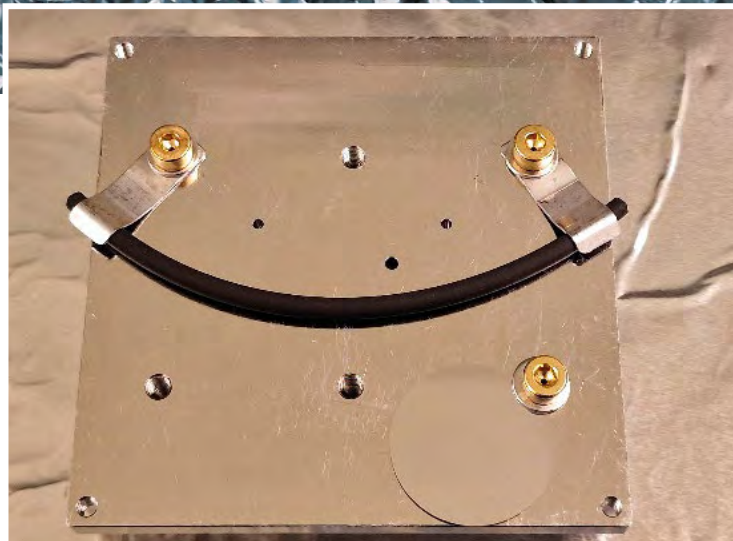


Aart Kleyn

Redactielid NEVAC blad

Inhoud

- 2 Van de redactie
Terug van weggeweest
- 4 Plasma-geassisteerde
atoomlaagdepositie
Artikel NEVAC-prijswinnaar
- 12 Vervanging van PFAS
Europese studie TNO
- 17 Van het bestuur
Verkiezing vicevoorzitter
- 18 NEVAC-dag 2025
Programma en sprekers
- 22 NEVAC ALV 2025
Agenda
- 23 Nieuws
- 24 Loopbaan in vacuüm
Bert Suurmeijer – Van
apparatenbouwer tot
boekenschrijver



- 29 Verslag IUVSTA-workshop
- 32 VCCN Cleanliness Day 2025
Samenwerking en
beheersing in de keten
- 35 Schroefpomptechnologie
Voor het laboratorium
- 38 Stel je voor
Jean-Baptiste Thouvenin
- 40 Virtueel lek boutverbinding
Test van boutoplossingen
- 43 Agenda

- 12 Testsample voor onderzoek aan
vervanging PFAS voor O-ringen.
(Bron: TNO)

Cover

Cleanroom van het TU/e Nanolab,
waar onder meer onderzoek
aan plasma-geassisteerde
atoomlaagdepositie plaatsvindt.
(Foto: Bart van Overbeeke)

Colofon

Redactie

Rients de Groot
Aart Kleyn
René Koops
Ronald Sherifff
Hans van Eerden (eindredacteur)
redactie@nevac.nl

Grafische vormgeving

Snep

Druk

Drukkerij Thijsen

Verschijningsdata 2025

April / September / December

Web-adres

www.nevac.nl

Abonnementen (voor niet-leden)

Binnenland € 100,- per jaar
Buitenland € 150,- per jaar

Advertentie-exploitatie

NEVAC
René Erkelens
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 wetenschap en industrie worden
door de redactie zeer op prijs gesteld.
Voor studenten en promovendi is
een vergoeding beschikbaar van
€ 250,- per gepubliceerd artikel.

ISSN 0169-9431

Sluitingsdatum kopij

NEVAC blad 2025 nr. 2:
25 juni 2025

Plasma-geassisteerde atoomlaagdepositie van supergeleidende metaalnitriden voor quantumtechnologieën

Door de ontwikkeling van quantumcomputers gloort een ongekende revolutie in rekenkracht. Echter, de nanometerschaalstructuren die nodig zijn om de vereiste qubits en quantumcircuits de juiste functionaliteit te geven, behoeven zeer zuivere materialen en nauwkeurige aangroei. De vacuümtechniek plasma-geassisteerde atoomlaagdepositie blijkt een veelbelovende methode te zijn, zoals we laten zien voor de aangroei van supergeleidende TaN- en NbTiN-lagen met beheersing van de materiaaleigenschappen. Het is een noodzakelijke uitbreiding van de ‘quantumgereedschapskist’.

Silke Peeters, Erwin Kessels en Harm Knoops

Over de auteurs

Silke Peeters (promotie-onderzoeker), Erwin Kessels (professor) en Harm Knoops (assistant professor) zijn verbonden aan de onderzoeksgroep Atomic Scale Processing, Faculteit Applied Physics van de Technische Universiteit Eindhoven. Harm Knoops werkt ook voor Oxford Instruments Plasma Technology in Bristol (VK).

Dit artikel is bekroond met de NEVAC-prijs 2025, voor het beste ingezonden artikel geschreven door een student of promovendus. De hoofdauteur, Silke Peeters, geeft tijdens de NEVAC-dag op 6 juni (zie pag. 18) een presentatie over haar werk.

www.tue.nl/pmp
plasma.oxinst.com
www.atomiclimits.com

Quantumtechnologie brengt revolutionaire methoden voor computerberekeningen, communicatie en detectie. Toepassingen lopen uiteen van snellere medicijnontwikkeling door tot dusver onmogelijke simulaties tot potentieel onhackbare quantumcryptie. Nederland blinkt uit in aantallen quan-

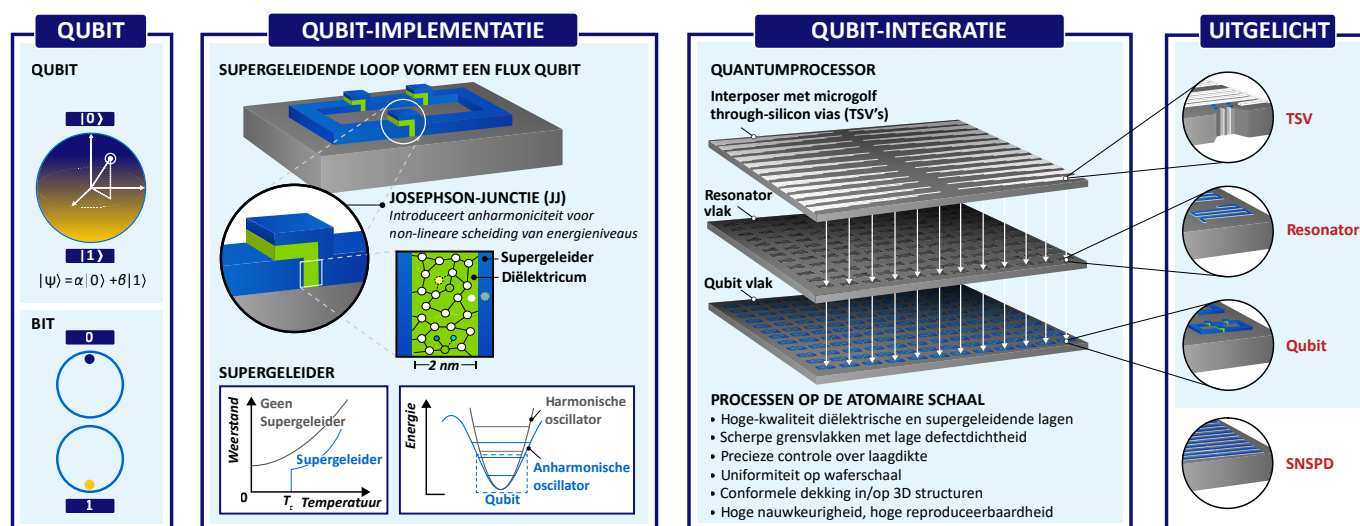
tumstart-ups en was in 2023 wereldwijd koploper met meer dan één quantumstart-up per miljoen inwoners. In absolute aantallen duldt Nederland slechts de VS, Canada en het VK voor zich [1]. Het merendeel van het Nederlandse onderzoek richt zich op supergeleidende quantumcomputers, een van de meest volwassen en geavanceerde platforms binnen de quantumtechnologie. Verdere commerciële groei in dit vakgebied hangt af van verbeteringen in materialen

en verwerkingstechnieken. Net zoals in de nano-elektronica kunnen processen op atomaire schaal een grote impact hebben op quantumtechnologie.

In ons onderzoeksproject “Atomic Layer Deposition and Etching for Quantum Computing” stemmen wij verwerkingsprocessen op atomaire schaal af op de specifieke eisen van de quantumtechnologie. Dat onderzoek voeren we onder meer



Figuur 1. Cleanroom van het TU/e Nanolab, met op de voorgrond twee ALD-apparaten (zie verderop in de tekst): links de FlexAL en rechts de PlasmaPro ASP. (Foto: Bart van Overbeeke)



Figuur 2. Illustratie van de werking van een supergeleidende qubit en de integratie daarvan in een quantumprocessor. Eén manier om het twee-toestandensysteem van de qubit (paneel 1) te implementeren, is via supergeleidende structuren van enkele tientallen tot honderden nanometers dik, gecombineerd met 1-2 nm diëlektrische lagen (paneel 2). Dit resulteert in een anharmonische oscillatorpotentiaal. De quantumprocessor (paneel 3) is opgebouwd uit het qubitvlak, het resonatorvlak en de interposer met *through-silicon vias* (TSV's), die de vlakken met elkaar verbinden. De voordelen van processen met een nauwkeurigheid op atomaire schaal voor nanofabricage van een dergelijke processor zijn aangegeven. Naast de TSV, resonator en qubit wordt in dit artikel ook de supergeleidende nanodraad-enkelefotondetector (SNSPD) uitgelicht (paneel 4).

uit in de cleanroom van het TU/e Nanolab (Figuur 1). Op 20 mei organiseren we een gelijknamige workshop, met als doel een actueel overzicht van het vakgebied te geven. Deskundigen zullen de vele kansen en uitdagingen presenteren vanuit het perspectief van materialen, processen en toepassingen. In dit artikel delen we onze nieuwste inzichten over de aangroei van supergeleidende metaalnitriden voor quantumtechnologieën via plasma-geassisteerde atoomlaagdepositie.

Quantumtechnologie

Supergeleidende circuits spelen een hoofdrol in de verwezenlijking van grootschalige quantumsystemen. Supergeleidende quantumcomputers worden ontwikkeld door toonaangevende bedrijven in de computerindustrie, zoals Google en IBM, en door snelgroeijende Nederlandse start-ups zoals QuantWare en Qblox. In plaats van de klassieke bit gebruikt een quantumcomputer de quantumbit (qubit) als eenheid van informatie, die zich in een superpositie van 0 en 1 kan bevinden (Figuur 2).

Om de qubittoestanden te besturen en uit te lezen, zijn circuitcomponenten en verbindingen nodig. Figuur 2 toont een illustra-

tie van een supergeleidende quantumprocessor geïnspireerd op de IBM Quantum Eagle-processor [2]. Naast supergeleidende qubits bevat de processor resonatoren en *through-silicon vias* (TSV's). Resonatoren – verantwoordelijk voor het manipuleren, uitlezen en beschermen van qubits – zijn LC-circuits met een vergelijkbare typische laagdikte als die van de qubits: enkele tientallen tot honderden nanometers [3]. De TSV, een verticale elektrische verbinding die meestal bestaat uit ongeveer 100 nm supergeleidend materiaal, biedt driedimensionale connectiviteit [4].

Naast quantumcomputers is er een breed scala aan quantumtoepassingen die supergeleidende lagen vereisen. Een veelbelovend voorbeeld is de supergeleidende nanodraad-enkelefotondetector (*superconducting nanowire single-photon detector*, SNSPD) [5], met toepassingen variërend van quantumcryptografie tot optische quantumcomputers. In tegenstelling tot de dikkere lagen die nodig zijn voor qubits, worden SNSPD's vervaardigd uit slechts enkele nanometers materiaal.

De functionaliteit van supergeleidende quantumsystemen is sterk afhankelijk

van materiaaleigenschappen en defecten. In quantumcomputers leiden bronnen van ruis, zoals onzuiverheden en wanordelijke grensvlakken, tot fouten in quantumalgoritmes (Figuur 3). Momenteel moeten de foutpercentages drastisch worden verlaagd om grootschalige quantumcomputers haalbaar te maken. Dit vereist aanzienlijke vooruitgang in zowel de materialen als de fabricageprocessen [6]. Verder is het voor de ontwikkeling van SNSPD-technologie essentieel om alternatieve supergeleidende materialen te onderzoeken en hun eigenschappen te optimaliseren om de gevoeligheid van de detector te verbeteren. Het kan bijvoorbeeld wenselijk zijn om meer wanorde in de kristalstructuur te introduceren voor efficiënte fotondetectie in het midden- tot ver-infraroodbereik [5]. De aangroei van supergeleidende lagen voor uiteenlopende quantumtechnologieën vereist daarom uiterst nauwkeurige en zuivere processen met beheersing van de materiaaleigenschappen.

Materialen en processen

Hoewel er nog geen algemene consensus is bereikt over materialen en fabricageprocessen in het veld, is er voldoende overlap



Figuur 3. Een bewerkte supergeleidende laag met mogelijke bronnen van ruis die de functionaliteit van de laag negatief beïnvloeden.

om de state-of-the-art depositietechnieken te identificeren. Vacuümtechnieken spelen hierbij een cruciale rol. De aangroei van lagen moet plaatsvinden in een gecontroleerde, ultraschone omgeving om bronnen van ruis in materialen en op grensvlakken tot een minimum te beperken. Doorgaans worden supergeleidende lagen voor qubits, resonatoren en TSV's

gerealiseerd door middel van fysische of chemische dampafzetting: *physical vapor deposition* (PVD) hetzij *chemical vapor deposition* (CVD) [4,7,8].

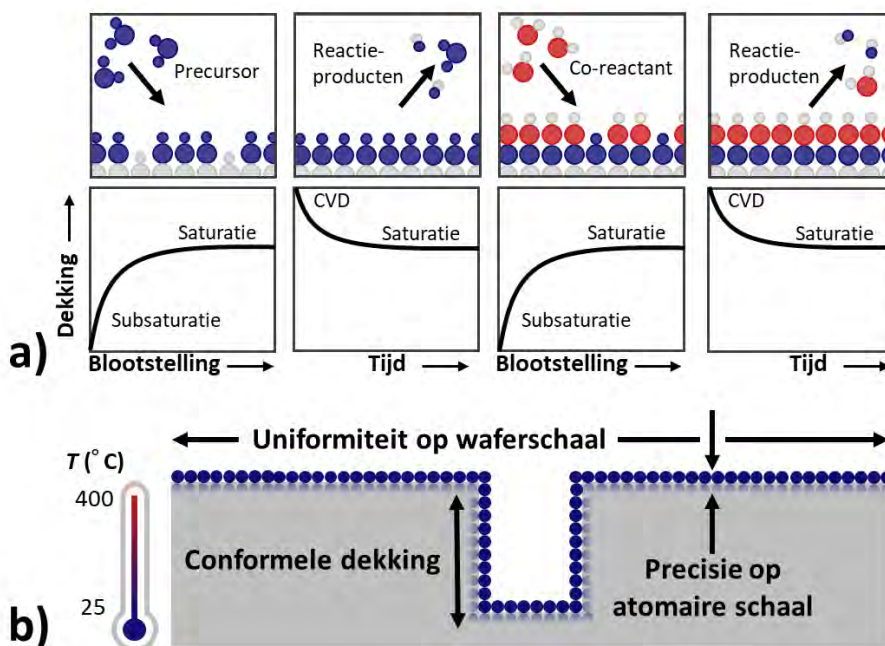
Veelvoorkomende materialen zijn tantalum (Ta), niobium (Nb), aluminium (Al), titaniumnitride (TiN) en niobium-titaniumnitride (NbTiN). Voor SNSPD's worden

vaak dunne metaalnitrider- en silicidelagen, zoals niobiumnitride (NbN), NbTiN, wolfraamsilicide (WSi) of molybdeensilicide (MoSi), toegepast, meestal via PVD [5,9]. Zowel PVD- als CVD-processen combineren hoge materiaalkwaliteit met een redelijk hoge doorvoersnelheid. Echter, de schaalbaarheid van deze depositiemethoden kan beperkt zijn. Dit geldt vooral bij het aanbrengen van supergeleidende materiaal op TSV's met hoge aspectverhouding of het waarborgen van uniforme dunne lagen op waferschaal voor SNSPD's.

De uitdagingen bij de opschaling van quantumtechnologieën vertonen parallellen met de obstakels die zijn overwonnen in recente generaties van nano-elektronische schakelingen [6]. Dit betreft uitdagingen op het gebied van de materialen, zoals heterogeniteit van bulkmaterialen, wanordelijke grensvlakken en onzuiverheden aan het oppervlak. Maar die parallel geldt ook voor verwerkingsuitdagingen, waaronder het verkrijgen van driedimensionale connectiviteit en betrouwbare fabricage op waferschaal.

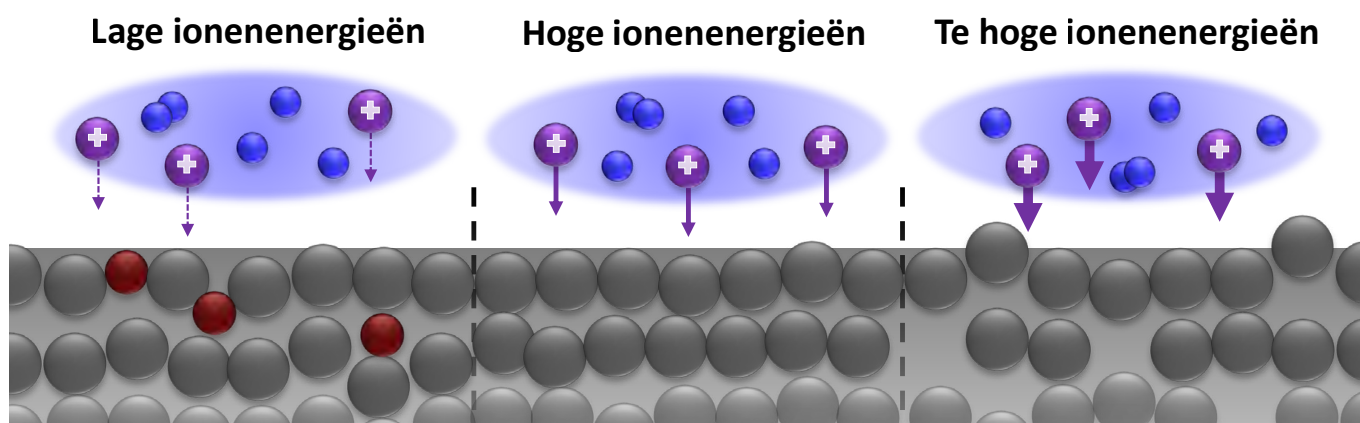
Atoomlaagdepositie (*atomic layer deposition*, ALD), een vacuümtechniek die al stevig is ingebed in de halfgeleiderindustrie, is hier veelbelovend. Dit vanwege de verkregen atomaire precisie, beheersing van de chemische samenstelling en compatibiliteit met grootschalige fabricage (Figuur 4) [10,11]. De laag-voor-laag-aangroei van ALD resulteert in ultradunne lagen met een atomaire vlakheid en conformele dekking. Bovendien maken de uniformiteit en herhaalbaarheid op waferschaal ALD tot een mogelijke sleuteltechnologie voor grootschalige quantumtoepassingen.

De fabricage-uitdagingen van quantumsystemen hebben in de afgelopen jaren geleid tot onderzoek naar ALD van supergeleidende materialen [12-14]. Deze studies richten zich voornamelijk op metaalnitriden, mede vanwege hun doorgaans hogere oxidatieweerstand en hogere kritische temperatuur voor supergeleiding in ver-



Figuur 4. Het principe van ALD.

- Een schematische weergave van de verschillende stappen in een ALD-cyclus, die bestaat uit twee opeenvolgende chemische oppervlaktereacties, de halfreacties. In de eerste halfreactie wordt de precursor, die het metaalatoom bevat, gedoseerd en adsorbeert een atomaire laag op het oppervlak. In de tweede halfreactie wordt het oppervlak blootgesteld aan de co-reactant, die reageert met de geadsorbeerde precursor. Beide halfreacties zijn zelfbeperkend en reageren alleen met de beschikbare posities op het oppervlak, zodat ze vanzelf stoppen. Tussen de halfreacties worden spoelstappen uitgevoerd.
- Overzicht van de voordelen van ALD: uniformiteit over grote substraatoppervlakken, conformele dekking van driedimensionale structuren, atomaire precisie en aangroei bij lage temperaturen. Een soortgelijke figuur werd eerder gepubliceerd in [10].



Figuur 5. Lage ionenenergieën tijdens de plasmastap in PEALD van metaalnitriden kunnen leiden tot lagen met een lage dichtheid en aanzienlijke concentraties zuurstof. Het verhogen van de ionenenergie verbetert doorgaans de materiaalkwaliteit door verdichting en het verwijderen van deze onzuiverheden. Echter, te hoge ionenenergieën kunnen structurele schade veroorzaken.

gelijking met hun tegenhangers van puur metaal. Nu ALD aan populariteit wint binnen de quantumtechnologie, is dit het ideale moment om ALD-materialen en -processen te ontwikkelen die specifiek zijn afgestemd op de eisen van quantumtoepassingen.

PEALD van supergeleidende nitriden met substrate biasing

Voor de aangroei van hoogwaardige supergeleidende nitriden is plasma-geassisteerde ALD (*plasma-enhanced atomic*

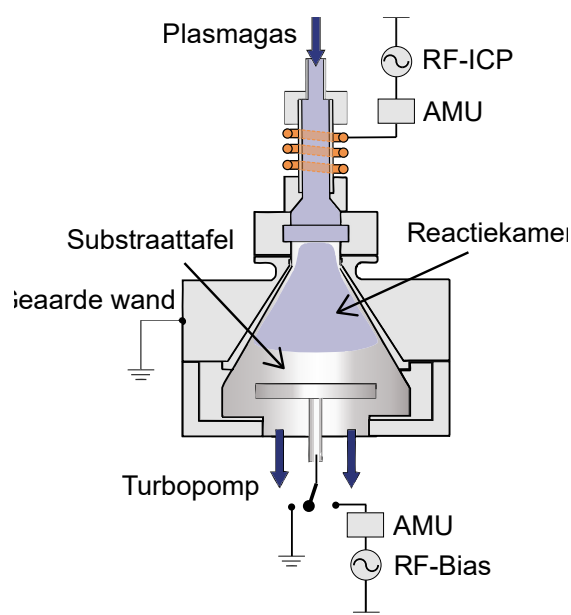
layer deposition, PEALD) veelbelovend. De extra reactiviteit die het plasma als co-reactant levert, verbetert de zuiverheid, kristalliniteit en elektrische geleidbaarheid van de aangegroeide lagen, zelfs bij lagere depositietemperaturen [15]. Bovendien biedt het gebruik van een plasma een nieuw scala aan procesparameters. Neem de inzet van *substrate biasing*: het aanbrengen van een (radiofrequente) elektrische potentiaal over de substraathouder waarmee de energie van de ionen die het oppervlak bombarderen tijdens de plasmastap kan worden beheerst.

In eerder werk hebben we aangetoond dat met deze beheersing van de ionenenergie materiaaleigenschappen nauwkeurig kunnen worden beïnvloed. Een nauwkeurig ingestelde ionenenergie leidt bijvoorbeeld tot een aanzienlijke verbetering van de elektrische geleidbaarheid en de kritische temperatuur T_c van supergeleiding bij de aangegroeide materialen [16,17]. Precieze beheersing van de ionenenergie is essentieel: voldoende energie – meestal in het bereik van 100 eV – is

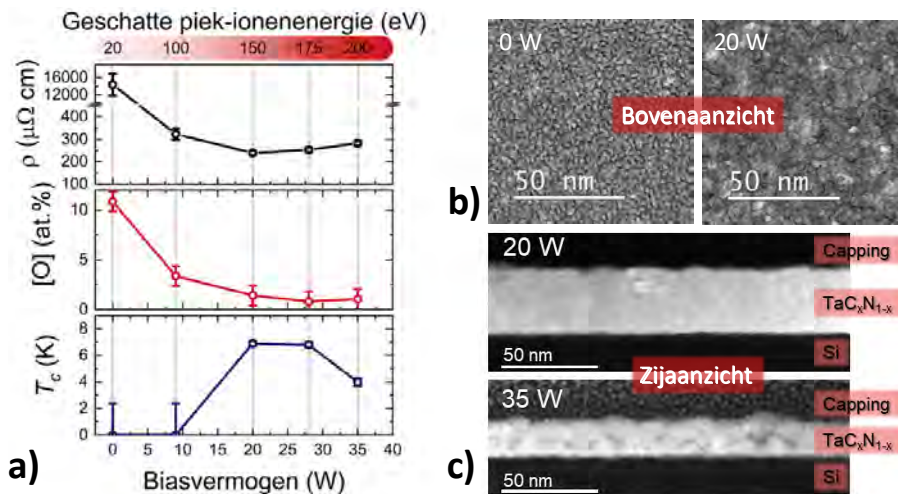
nodig om de elektrische geleidbaarheid te verbeteren, maar te hoge ionenenergieën (> 200 eV) leiden tot degradatie van het materiaal (Figuur 5).

De meeste studies naar het aanleggen van een biasspanning op de substraathouder tijdens het ALD-proces zijn uitgevoerd op de Oxford Instruments FlexAL ALD-reactor (Figuren 1 en 6). Deze reactor beschikt over een inductief gekoppelde plasmabron (*inductively coupled plasma*, ICP), bestaande uit een cilindrische spoel met meerdere windingen rond een aluminiumoxide-ontladingsbuis. De bron bevindt zich op afstand van de substraattafel, wat resulteert in ionenfluxen van ongeveer 10^{13} - 10^{14} $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ op het substraat voor typische lagedrukplasma's van enkele mTorr [18]. Om de zuiverheid van het proces te waarborgen, is de reactor uitgerust met een turbopomp die de kamer efficiënt spoelt tussen doseerstappen.

Voor de aangroei van geleidende nitriden worden doorgaans $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{N}_2$ -plasma's gebruikt in combinatie met een precursor die het gewenste metaal bevat. Waterstof bevordert primair de chemische reductie van het metaalatoom in de precursor, terwijl argon voornamelijk bijdraagt aan het fysieke ionenbombardement. Het gebruik van stikstof is afhankelijk van het metaal. Bij tantaalgebaseerde chemie leidt de aanwezigheid van stikstof tot de depositie van niet-geleidend tantaalnitri-



Figuur 6. Illustratie van het FlexAL ALD-systeem van Oxford Instruments met een radiofrequente (RF) inductief gekoppelde plasmabron en een RF-substraatbiasbron, voorzien van een automatische matching-eenheid ('automatic matching unit'; AMU).



Figuur 7. PEALD van TaN.

- Soortelijke weerstand ρ bij kamertemperatuur, zuurstofgehalte [O] en kritische temperatuur T_c van supergeleiding als functie van het vermogen van de RF-substraatbias, met geschatte ionenenergieën voor 20 nm TaN-lagen.
- High-angle annular dark-field - scanning transmissie elektronenmicroscopie (HAADF-STEM) in bovenaanzicht van lagen aangegroeit met 0 en 20 W vermogen.
- HAADF-STEM in zijaanzicht van lagen aangegroeit met 20 en 35 W vermogen.

de, Ta_3N_5 . Stikstof wordt daarom vermeden voor de aangroei van geleidend TaN [19]. Daarentegen wordt stikstof bij NbN ALD-processen juist toegevoegd om de stoichiometrie te verbeteren [20].

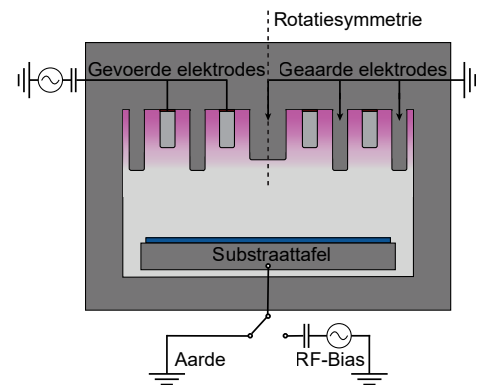
PEALD van TaN met beheersing ionenenergie op FlexAL

Het belang van ionenenergie wordt duidelijk in de aangroei van dunne, supergeleidende TaN-lagen op siliciumsubstraten in het FlexAL-systeem [17]. Deze lagen zijn polykristallijn, zoals typisch is voor geleidende dunne lagen die via PEALD worden gedeponereerd. Figuur 7 toont de soortelijke weerstand op kamertemperatuur, het zuurstofgehalte en de kritische temperatuur T_c van supergeleiding voor 20 nm TaN-lagen als functie van het aangelegde vermogen van de substraatbias. Bij een geaard substraat, wat overeenkomt met een ionenenergie van ~ 20 eV, is de soortelijke weerstand relatief hoog: $14 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$. Echter, een gematigde toename tot ~ 100 eV verlaagt de soortelijke weerstand met twee ordes van grootte naar $240 \mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Deze aanzienlijke afname kan worden verklaard door verbeteringen van zowel de chemische samenstelling als de kristalliniteit. Verhoogde ionenenergieën verminde-

ren de zuurstofopname in de laag, waarbij het zuurstofgehalte daalt van 11 at.% bij een geaard substraat tot slechts 1 at.% bij hogere ionenenergieën. Transmissie-elektronenmicroscopie (TEM) toont aan dat dit gepaard gaat met een grotere kristalkorrelgrootte, wat leidt tot een vermindering van het totale korrelgrensooppervlak en dus een betere elektrische geleiding. Echter, bij verdere verhoging van de ionenenergieën tot ~ 200 eV treedt enige degradatie van de soortelijke weerstand op. TEM-afbeeldingen, die dwarsdoorsneden laten zien, maken duidelijk dat zich bij deze energieën poriën vormen in de TaN-lagen. Dit geeft de noodzaak van een zorgvuldige balans aan: voldoende ionenenergie om de geleidbaarheid te optimaliseren, zonder structurele schade te veroorzaken.

Dit optimum weerspiegelt zich ook in de metingen van de kritische temperatuur T_c van supergeleiding. Rond de ideale ionenenergie wordt een T_c van 7 K bereikt voor TaN-lagen met een dikte tussen 10 en 40 nm, wat duidt op hoogwaardige grensvlakken. Vergelijkbare T_c -waarden zijn gerapporteerd voor TaN op silicium dat met andere technieken is gedeponereerd, maar doorgaans enkel voor aanzienlijk dikkere lagen (~ 100 nm) [21,22].



Figuur 8. Illustratie van het PlasmaPro ASP-systeem van Oxford Instruments, met een op afstand RF capacitief gekoppelde plasmabron (CCP), en een substraatbiasbron, uitgerust met een automatische matching-eenheid (AMU).

Snelle PEALD van NbTiN met beheersing ionenenergie op PlasmaPro ASP

Ondanks de veelzijdigheid en compatibiliteit met andere vacuümtechnieken, blijft de schaalbare integratie van PEALD in quantumtoepassingen een uitdaging door de lage depositiesnelheid. Typisch ligt deze rond de 5 nm/uur , aanzienlijk trager dan de $\sim 10\text{--}300 \text{ nm/min}$ die wordt gerapporteerd voor NbTiN aangebracht met sputteren [23]. Deze lage aangroeisnelheid van PEALD vormt een knelpunt, vooral gezien de benodigde laagdiktes van tientallen tot honderden nanometers voor qubits, resonatoren en TSV's.

Om hoge depositiesnelheden te realiseren zonder concessies te doen aan de vacuümcondities, is het Oxford Instruments PlasmaPro ASP-systeem ontworpen (Figuren 1 en 8) [24]. Net als in de FlexAL kan een biasspanning worden aangelegd op de substraathouder, maar de plasmabron is capacitief gekoppeld (CCP). De CCP-bron bestaat uit concentrische ringen, die afwisselend geaard en gevoed zijn. Deze geometrie maakt plasma-op-afstand mogelijk, ondanks de afstand van slechts zes centimeter tot de substraattafel. Typische werkdrukken in dit systeem liggen rond de 100 mTorr, waarbij relatief lage ionenfluxen van $10^{13}\text{--}10^{14} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ op het substraat kunnen

worden bereikt, ondanks de nabijheid van de plasmabron. Het kleine kamervolume maakt kortere blootstellingen aan precursoren en plasma's mogelijk, wat resulteert in verbeterde depositiesnelheden.

NbN- en TiN-PEALD-processen zijn ontwikkeld en gecombineerd in een supercyclus-proces voor depositie van NbTiN (Figuur 9) [23]. Een supercyclus bestaat uit m ALD-cycli voor NbN en n ALD-cycli voor TiN, waarmee het Nb/(Nb+Ti)-gehalte in de laag nauwkeurig kan worden geregeld via de verhouding $m/(m+n)$. De groei per cyclus (GPC) ligt binnen het

verwachte bereik, in lijn met literatuur die een vergelijkbare chemie gebruikt [23]. Aangezien de GPC wordt beperkt door oppervlaktereacties, zou deze waarde niet afhangen van de gebruikte reactor. Het hier gepresenteerde proces heeft echter aanzienlijk kortere cyclustijden dankzij het kleine kamervolume en de nieuwe plasmabron. Dit resulteert in hoge depositiesnelheden van 25-58 nm/uur.

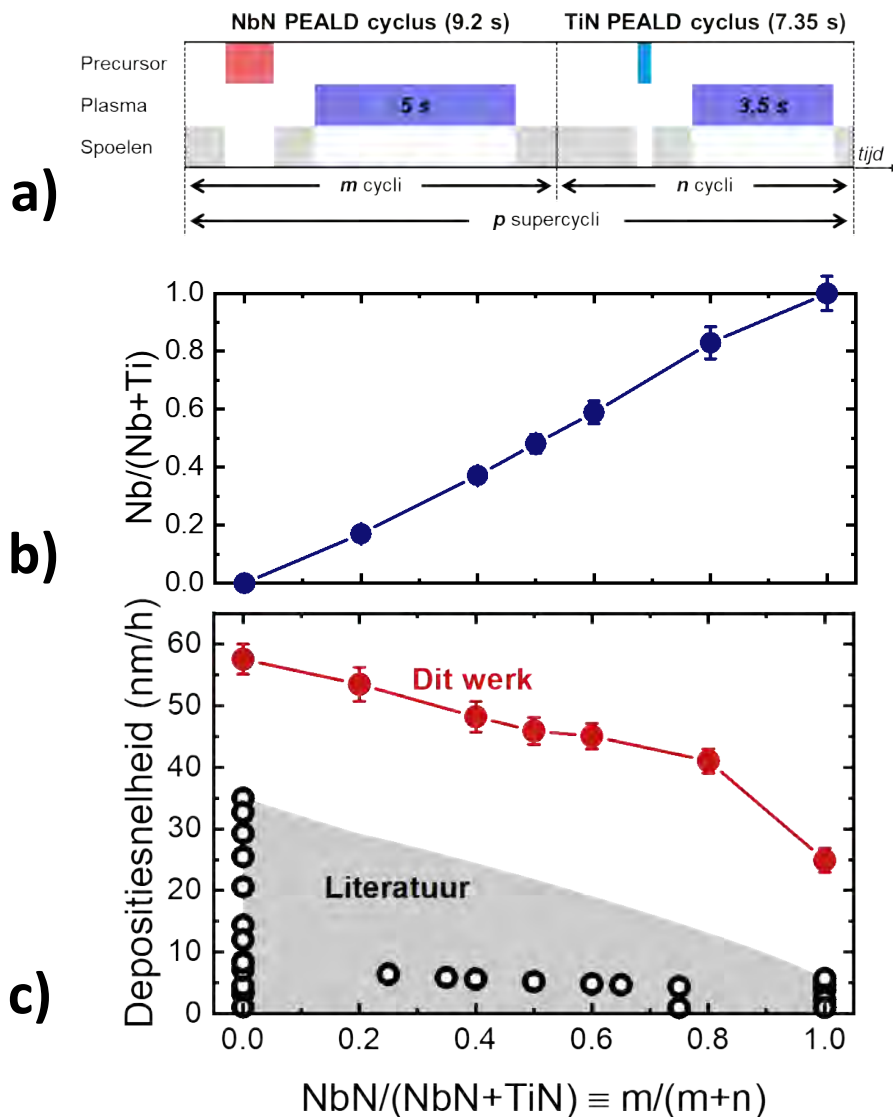
Voor Nb_{0,5}Ti_{0,5}N-lagen leidt een verhoging van de ionenenergie tot een vergelijkbare verbetering in de geleidbaarheid als die voor TaN (Figuur 10). Het PP ASP-systeem

introduceert echter ook enkele verschillen. In tegenstelling tot eerder werk aan metaalnitriden zoals TaN, TiN en HfN op het FlexAL-systeem [16,17,25], zien we geen invloed op de chemische samenstelling. In plaats daarvan is het zuurstofgehalte verwaarloosbaar voor alle onderzochte ionenenergieën. Dit kan worden toegeschreven aan de korte cyclustijden, die resulteren in een lagere zuurstofopname uit de reactorachtergrond [26], waardoor zuurstofverwijdering door energetisch ionenbombardement niet nodig is. Dit benadrukt het belang van schone vacuümomgevingen voor de aangroei van supergeleidende lagen.

Een ander opvallend verschil is het relatief kleine effect van ionenenergie op de T_c . Aangezien er geen significante zuurstofverontreinigingen zijn, neemt de T_c niet af bij gebruik van lagere ionenenergieën, ook omdat deze in tegenstelling tot de soortelijke weerstand niet gevoelig is voor korrelgrenzen. Dit laat ruimte voor subtielere invloeden van oppervlakteruwheid en structurele wanorde, die prominenter zijn bij hogere ionenenergieën.

Conclusie

Ons werk aan TaN en NbTiN laat zien dat PEALD met *substrate biasing* een krachtige techniek is om materiaaleigenschappen af te stemmen op quantumtoepassingen. De precisie in dikte en chemische samenstelling die inherent is aan ALD, gecombineerd met de nauwkeurige beheersing van ionenenergie via een substraatbias, maakt de reproduceerbare aangroei van complexe materialen mogelijk. Het veelzijdige karakter van PEALD biedt de beheersing van materiaaleigenschappen die nodig is voor het brede scala aan quantumtoepassingen. Ultradunne, wanordelijke lagen voor SNSPD's kunnen worden gedeponeerd, maar juist ook dikkere lagen met goede T_c -waarden voor quantumprocessors. Met de snelle vooruitgang in het quantumveld worden vacuümsystemen zoals de PlasmaPro ASP ontwikkeld met de specifieke behoeften van quantumtoepassingen in het achterhoofd. De verhoogde depositiesnelheden maken ALD een realistisch alternatief voor



Figuur 9. Het supercyclus-proces.

- Overzicht van de supercyclus bestaande uit m NbN-cycli en n TiN-cycli. De plasmastap kan met substraatbias worden uitgevoerd. Tijdens de zuiveringsstappen wordt argon aangevoerd.
- Niobiumgehalte, geschaald naar de som van het niobium- en titaniumgehalte.
- Depositiesnelheid in dit werk (rood) en in de literatuur (zwart) als functie van de cyclusverhouding $m/(m+n)$ [23].

de conventionele PVD- en CVD-technieken die vooralsnog worden gebruikt.

Toekomst van ALD in quantum

Hoe gaan we nu verder? De groeiende behoefte aan materiaal- en procesontwikkelingen biedt zowel kansen als uitdagingen. Zo kunnen bijvoorbeeld meer (complexe) supergeleidende materialen worden verkend met behulp van ALD. Daarnaast is ALD ook beloftevol voor het verbeteren van diëlektrica voor quantum, zoals de 1-2 nm Al_2O_3 -junctie in een supergeleidende qubit [7,27] en SiO_2 -passiveringslagen voor spin-qubits [28,29]. De stapsgewijze aangroei van lagen met ALD en de vele instelbare parameters bieden bovendien de kans om de prestaties van quantumsystemen systematisch te bestuderen op basis van materiaaleigenschappen, bijvoorbeeld door de structurele wanorde te variëren via de substraatbias.

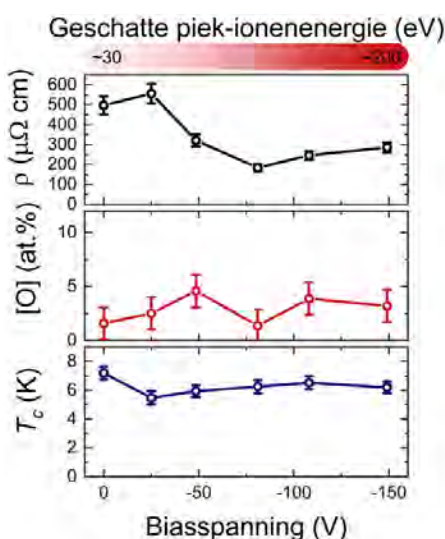
Belangrijke uitdagingen voor grootschalige implementatie van ALD-processen in quantumtoepassingen zijn onder meer de hoge depositiesnelheden die nodig zijn voor lagen van meer dan 100 nanometer, het verbeteren van de kristalliniteit van supergeleidende lagen en de integratie van de techniek met andere processen bij het ma-

ken van quantumsystemen. Om deze uitdagingen aan te gaan, is een nauwe samenwerking tussen experts op het gebied van vacuümtechnologie en Nederlandse quantumstart-ups van cruciaal belang. Deze en vele andere relevante onderwerpen komen aan bod in onze workshop op 20 mei op de Technische Universiteit Eindhoven [30].

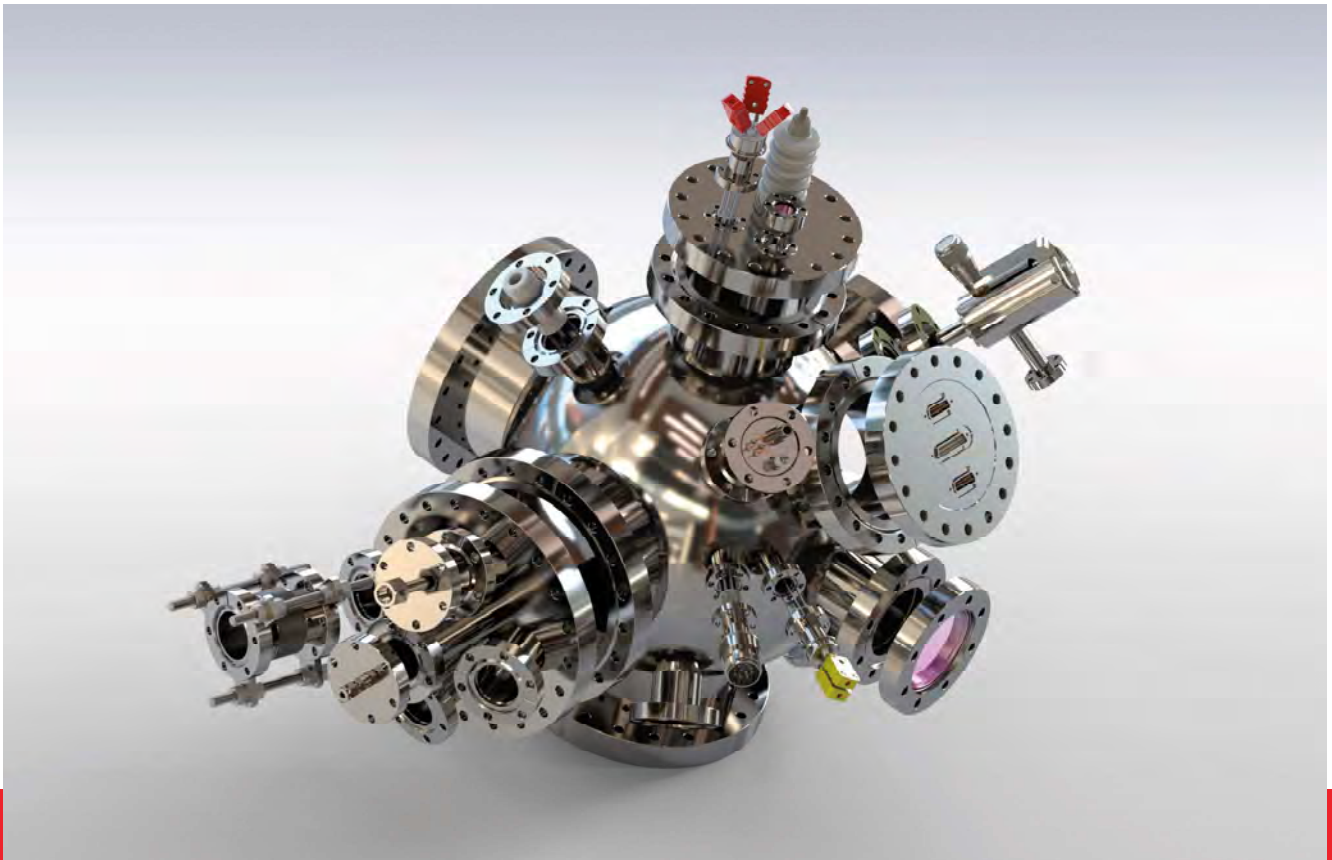
Referenties

- [1] Birch Consultants. *Ecosystem Update: QDNL Midterm Review*. (2024).
- [2] Chow, J., *et al.* IBM Quantum breaks the 100 qubit processor barrier. (2021).
- [3] Blais, A., *et al.* Quantum information processing and quantum optics with circuit quantum electrodynamics. *Nat Phys* **16**, 247–256 (2020).
- [4] Mallek, J.L., *et al.* Fabrication of superconducting through-silicon vias. *arXiv preprint arXiv:2103.08536* (2021).
- [5] Holzman, I. & Ivry, Y. Superconducting Nanowires for Single-Photon Detection: Progress, Challenges, and Opportunities. *Adv Quantum Technol* **2**, 1800058 (2019).
- [6] de Leon, N.P., *et al.* Materials challenges and opportunities for quantum computing hardware. *Science* (1979) **372**, eabb2823 (2021).
- [7] Murray, C. E. Material matters in superconducting qubits. *Mat Sci Eng: R: Reports* **146**, 100646 (2021).
- [8] McRae, C.R.H., *et al.* Materials loss measurements using superconducting microwave resonators. *Rev Sci Instr* **91**, 091101 (2020).
- [9] Morozov, D.V., *et al.* Superconducting photon detectors. *Contemp Phys* **62**, 69–91 (2021).
- [10] Knoop, H.C.M., *et al.* 27 - Atomic Layer Deposition. in *Handbook of Crystal Growth (Second Edition)* (ed. Kuech, T. F.) 1101–1134 (North-Holland, Boston, 2015). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63304-0.00027-5>.
- [11] Johnson, R.W., *et al.* A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications. *Mater Today* **17**, 236–246 (2014).
- [12] Sheagren, C., *et al.* Atomic Layer Deposition Niobium Nitride Films for High-Q Resonators. *J Low Temp Phys* **199**, 875–882 (2020).
- [13] Shearrow, A., *et al.* Atomic layer deposition of titanium nitride for quantum circuits. *Appl Phys Lett* **113**, 212601 (2018).
- [14] Taylor, G.G., *et al.* Infrared single-photon sensitivity in atomic layer deposited superconducting nanowires. *Appl Phys Lett* **118**, 191106 (2021).
- [15] Profijt, H.B., *et al.* Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition: Basics, Opportunities, and Challenges. *J Vac Sci & Technol A* **29**, 050801 (2011).

- [16] Faraz, T., *et al.* Tuning Material Properties of Oxides and Nitrides by Substrate Biasing during Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition on Planar and 3D Substrate Topographies. *ACS Appl Mater Interfaces* **10**, 13158–13180 (2018).
- [17] Peeters, S.A., *et al.* Ultrathin superconducting $\text{TaC}_x\text{N}_{1-x}$ films prepared by plasma-enhanced atomic layer deposition with ion-energy control. *Appl Phys Lett* **123**, 132603 (2023).
- [18] Faraz, T., *et al.* Energetic ions during plasma-enhanced atomic layer deposition and their role in tailoring material properties. *Plasma Sources Sci Technol* **28**, 024002 (2019).
- [19] Langereis, E., *et al.* Synthesis and in situ characterization of low-resistivity $\text{Ta}_x\text{N}_{1-x}$ films by remote plasma atomic layer deposition. *J Appl Phys* **102**, 083517 (2007).
- [20] Linde, A.V., *et al.* Self-propagating high-temperature synthesis of cubic niobium nitride under high pressures of nitrogen. *Chem Eng J* **155**, 542–547 (2009).
- [21] Chaudhuri, S., *et al.* Fabrication of superconducting tantalum nitride thin films using infrared pulsed laser deposition. *J Vac Sci & Technol A* **31**, 061502 (2013).
- [22] Breznay, N.P., *et al.* Superconductor to weak-insulator transitions in disordered tantalum nitride films. *Phys Rev B* **96**, 134522 (2017).
- [23] Peeters, S.A., *et al.* Superconducting $\text{Nb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{N}$ prepared at high deposition rates with plasma-enhanced atomic layer deposition and substrate biasing. *AVS Quantum Sci.* **7**, 026801 (2025).
- [24] Knoop, H.C.M., *et al.* Innovative remote plasma source for atomic layer deposition for GaN devices. *J Vac Sci & Technol A* **39**, 062403 (2021).
- [25] Karwal, S., *et al.* Plasma-Assisted ALD of Highly Conductive HfNx : On the Effect of Energetic Ions on Film Microstructure. *Plasma Chem Plasma Proc* **40**, 697–712 (2020).
- [26] Karwal, S., *et al.* Atomic insights into the oxygen incorporation in atomic layer deposited conductive nitrides and its mitigation by energetic ions. *Nanoscale* **13**, 10092–10099 (2021).
- [27] Lu, R., *et al.* Fabrication of $\text{Nb}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ Josephson Junctions Using In Situ Magnetron Sputtering and Atomic Layer Deposition. *IEEE Trans Appl Supercond* **23**, 1100705 (2013).
- [28] Camenzind, L.C., *et al.* A hole spin qubit in a fin field-effect transistor above 4 kelvin. *Nat Electron* **5**, 178–183 (2022).
- [29] Kuhlmann, A.V., *et al.* Ambipolar quantum dots in undoped silicon fin field-effect transistors. *Appl Phys Lett* **113**, 122107 (2018).
- [30] www.atomiclimits.com. Workshop Atomic Layer Deposition and Etching for Quantum Technologies.



Figuur 10. Soortelijke weerstand ρ bij kamertemperatuur, zuurstofgehalte [O] en kritische temperatuur T_c van supergeleiding als functie van de RF-substraatbias, met geschatte ionenenergieën, voor 30 nm NbTiN-lagen.



- Vacuum Components
- Custom Vacuum Chambers
- Custom Manipulators
- Mass Spectrometers and RGAs
- Mass Flow Control
- Plasma Treatment Systems
- PVD/CVD Systems

Specialized in Vacuum and Cryogenic Technology
with more than 50 years of experience

Vervanging van PFAS-polymeermaterialen in de semiconductor-industrie

PFAS-houdende materialen en/of processen zullen door strengere regelgeving vanwege hun gezondheidsrisico's in de toekomst mogelijk niet meer beschikbaar zijn. Vervanging zal echter vanwege zeer specifieke eigenschappen van PFAS-materialen niet eenvoudig zijn, onder meer in de semiconductor-industrie. TNO voert in een Europees 10-Ace demonstratieproject onderzoek uit naar alternatieve PFAS- (polymeer)materialen die in deze branche kunnen worden toegepast.

Anton de Jong en Joe Trimboli (TNO)

Inleiding

In het nieuws en de wetenschappelijke literatuur is veel aandacht voor de gevaren die het gebruik van PFAS-materialen met zich meebrengt. De productie en het gebruik van sommige specifieke soorten PFAS zijn gereguleerd en op de lange termijn wordt verwacht dat de regelgeving veel strenger zal worden, waardoor PFAS-houdende materialen en/of processen mogelijk niet meer beschikbaar zullen zijn. Dit betekent dat bedrijven op zoek moeten gaan naar alternatieve materialen om PFAS te vervangen. PFAS-materialen kunnen echter zeer specifieke eigenschappen hebben, waardoor vervanging geen eenvoudige taak zal zijn. In de semiconductor-productieketen worden zeer veel PFAS-houdende onderdelen, samenstellingen, processen en chemicaliën gebruikt, zowel in de front-end industrie (het maken van de transistoren/structuren) als tijdens het daarna produceren van complete chips (back-end industrie).

Wat zijn PFAS-materialen?

PFAS (perfluoralkyl- en polyfluoralkylstoffen) is een grote groep van meer dan 10.000 synthetische chemicaliën die sinds de jaren 1930 worden geproduceerd. Deze stoffen

zijn zeer stabiel en moeilijk afbreekbaar zijn. PFAS worden gebruikt in een breed scala aan consumenten- en industriële producten, zoals anti-aanbakkeergerei, sportartikelen, waterafstotende kleding en brandblusschuim, en – zoals in dit artikel besproken – in de gehele semiconductor-industrie.

Gezondheidsaspecten

Er is groeiende bezorgdheid over de mogelijke gezondheidsrisico's van PFAS. Studies hebben aangetoond dat blootstelling aan bepaalde PFAS-verbindingen tot een reeks gezondheidsproblemen kan leiden, waaronder hormonale verstoringen, kanker en invloed op het immuunsysteem [1]. Doordat PFAS zich ook al in lage concentraties in het voedsel bevinden (dagelijkse boodschappen) en in het bijzonder ook in het drinkwater, kan het voorkomen dat een deel van de consumenten aanzienlijk meer PFAS opneemt – in voorkomende gevallen al meer

worden gebruikt in verschillende industriële toepassingen vanwege hun unieke eigenschappen, zoals water- en vetafstotendheid, thermische stabiliteit en chemische inertie. PFAS worden vaak 'forever chemicals' genoemd, omdat ze zeer persistent in het milieu en/of het menselijk lichaam zijn, wat tot bezorgdheid over hun potentiële gezondheids- en milieueffecten leidt. In het bijzonder vormen de fluor- en koolstofatomen onderling zeer sterke bindingen, waardoor deze stof-



Figuur 1. Een lithografiemachine kan uit meer dan 100.000 onderdelen bestaan. (Bron: ASML)

dan de wettelijke normen die daarvoor gelden. Doordat deze stoffen in het milieu niet afbreken en zich via lucht en regen over grote afstanden verspreiden, is een terugdringing van de blootstelling alleen effectief indien op internationaal niveau maatregelen worden getroffen om het gebruik van PFAS-bevattende producten terug te dringen.

Internationale wetgeving

Vanwege de gezondheids- en milieubezwaren zijn er wereldwijd steeds strengere regelgeving en beperkingen voor het gebruik van PFAS afgesproken. Internationale organisaties zoals de EU en ook de VS hebben maatregelen genomen om het gebruik van PFAS te beperken en de uitstoot ervan te verminderen. Dit heeft geleid tot een groeiende behoefte aan veilige en effectieve vervangende materialen in verschillende industrieën, waaronder de semicon.

PFAS in front- en back-end

PFAS-materialen worden in verschillende stadia van de semicon-productieketen gebruikt [2,3]. In de front-end productie, waar de feitelijke chipfabricage plaats-

vindt, worden PFAS onder meer vanwege de chemische stabiliteit en lage uitgassing toegepast. In de back-end productie, waar de chips worden verpakt en getest, worden PFAS-materialen onder meer voor hun slijtvastheid en goede tribologische eigenschappen gebruikt.

Er zijn meerdere (detail)eigenschappen van PFAS-materialen omwille waarvan ze worden gebruikt in de semicon, zoals:

1. Goede reinheid.
2. Goede chemische resistentie.
3. Beperkte permeabiliteit.
4. Hoge temperatuurstabiliteit.
5. Lage frictiecoëfficiënt.
6. Lage ontvlambaarheid.
7. Goede vuilwerende eigenschappen.
8. Goede elektrische isolatie-eigenschappen.
9. Goede verwerkbaarheid.
10. Lage bacteriegroei.

De hightech-machines bevatten onderdelen met een hoog percentage PFAS (zoals O-ringen, vloeistof- en gasleidingen, smeermiddelen, afdichtingsmaterialen en kabels). De moderne chipproductie-

machines kunnen uit tienduizenden onderdelen en/of samenstellingen bestaan (Figuur 1), waarvan een deel PFAS-materialen zijn, of onderdelen die geproduceerd zijn met PFAS-houdende materialen [2]. De toegepaste PFAS-materialen voldoen daarbij aan een groot aantal technische eisen die moeilijk met alternatieve materialen te realiseren zijn.

PFAS-polymeeronderdelen

TNO heeft als strategie gekozen om eerst naar de alternatieven voor PFAS-polymeeronderdelen voor de semicon te kijken. Er is een grote diversiteit aan onderdelen binnen deze categorie in een semiconductor-machine. PFAS-polymeer-materialen worden functioneel ingezet in verschillende onderdelen, zoals:

1. Afdichtingen

O-ringen bijvoorbeeld bevatten PFAS vanwege hun chemische bestendigheid en lage uitgassing. Ze zorgen voor een betrouwbare afdichting in apparatuur die onder meer aan agressieve chemicaliën of gassen wordt blootgesteld. De lage gasdoorlaatbaarheid, relatief hoge temperatuurbelastbaarheid en de weerstand tegen hoge compressiekrachten maken PFAS O-ringen bijzonder geschikt voor vacuütoepassingen.

2. Slangen en pakkingen

Deze worden gebruikt in chemische transport- en verwerkingssystemen. PFAS-materialen bieden uitstekende chemische bestendigheid, flexibiliteit en duurzaamheid.

3. Coatings

Deze worden toegepast op apparatuur om slijtage en deeltjesproductie te verminderen. PFAS-coatings helpen bij het handhaven van de prestaties en betrouwbaarheid van de apparatuur. Bovendien zijn deze PFAS-coatings tegen olie en water bestand.

4. Kabels/draden/bevestigingsmateriaal

Fluoropolymeren hebben een uitstekende elektrische isolatieweerstand, een lage uitgassing waardoor ze geschikt zijn voor vacuütoepassingen, een relatief hoge temperatuurbelastbaarheid en voldoende mechanische sterkte.

Belangrijkste toepassingen van PFAS

De unieke eigenschappen van PFAS maken ze onmisbaar in verschillende toepassingen binnen de semicon-industrie. Enkele van de belangrijkste toepassingen zijn [2]:

1. Fotolithografie

PFAS worden gebruikt in fotolak en etsmiddelen vanwege hun chemische inertie en stabiliteit. Deze materialen helpen bij het nauwkeurig overbrengen van patronen op de wafers. Daarnaast worden PFAS-chemicaliën vaak gebruikt vanwege hun oplosbaarheid in lithografievloeistoffen, stabiliteit en diffuse eigenschappen.

2. Reiniging

PFAS-gebaseerde oplosmiddelen worden voor het reinigen van wafers en apparatuur gebruikt. Ze verwijderen verontreinigingen effectief zonder de gevoelige oppervlakken te beschadigen.

3. Smeermiddelen

PFAS-materialen worden als smeermiddelen in bewegende delen van apparatuur gebruikt vanwege hun lage wrijvingscoëfficiënt. Dit helpt bij het verminderen van slijtage en het verlengen van de levensduur van de apparatuur.

4. Afdichtingen en pakkingen

PFAS-materialen worden in afdichtingen en pakkingen toegepast vanwege hun chemische bestendigheid en lage uitgassing. Ze zorgen voor betrouwbare afdichtingen in agressieve chemische omgevingen en hebben gunstige mechanische (elastische) eigenschappen en een relatief hoge temperatuurbelastbaarheid.



Figuur 2. Diverse types O-ring die op specifieke eigenschappen worden getest.
(Bron: Shutterstock)

Praktijkonderzoek O-ringen

TNO heeft een onderzoek gestart naar de vervanging van PFAS-houdende O-ringen (Figuur 2). Dit onderzoek wordt uitgevoerd in het Europese 10Ace-project, waarin wordt samengewerkt met enkele bedrijven uit de semicon.

Aanpak

De aanpak van het onderzoek omvat het testen van diverse PFAS-vrije O-ringen, voor drie soorten toepassingen (atmosferische, vacuüm- en plasmacondities), waarbij onder meer de volgende eigenschappen worden getest:

1. Mechanische eigenschappen

De sterkte en flexibiliteit van de materialen worden getest om ervoor te zorgen dat de vervangende materialen tegen de operationele omstandigheden bestand zijn. Dit omvat treksterkte, rek bij breuk en hardheid.

2. Uitgassing

De mate van uitgassing van de materialen wordt gemeten om te garanderen dat ze geen verontreinigingen veroorzaken. Lage uitgassing is cruciaal om de zuiverheid van de productieomgeving te handhaven.

3. Slijtagegedrag

De slijtvastheid van de materialen wordt geëvalueerd om hun duurzaamheid te waarborgen. Dit omvat tests zoals slijtage door wrijving en abrasie.

4. Deeltjesproductie

De hoeveelheid deeltjes die de materialen produceren, wordt gemeten omdat deeltjes de productieprocessen kunnen verstoren. Lage deeltjesproductie is essentieel om defecten in de chips te voorkomen.

5. Chemische stabiliteit

De chemische bestendigheid van de materialen wordt getest om ervoor te zorgen dat ze niet reageren met andere chemicaliën in de productieomgeving. Dit omvat tests zoals chemische compatibiliteit en weerstand tegen UV-licht en plasmacondities.

Vergelijking met PFAS-houdende materialen

De nieuwe materialen worden getest en vergeleken met de bestaande PFAS-houdende materialen om hun geschiktheid te beoordelen. Hierbij wordt naar de prestaties op de bovengenoemde criteria gekeken. De resultaten van deze tests helpen bij het identificeren van de meest veelbelovende vervangende materialen.

Resultaten

Het resultaat van het onderzoek is het verstrekken van technische details over de mogelijke alternatieve materialen voor het vervangen van PFAS-houdende materialen. In het bijzonder wordt de informatie direct gekoppeld aan de beoogde toe-

passing. Indien een bedrijf overweegt een nieuw materiaal in te zetten of te ontwikkelen, moet duidelijk zijn aan welke eisen de PFAS-vervanger moet voldoen. Deze set van eisen is vaak ook afhankelijk van waar het product/onderdeel wordt toegepast en welke specifieke gebruikseisen voor het onderdeel gelden. Een O-ring voor het afdichten van een atmosferisch onderdeel zal minder strenge detaileisen hebben dan een ring die in een vacuüm-onderdeel zit, met daarbij eventueel blootstelling aan plasma of UV-licht.

De resultaten van het lopende onderzoek tonen aan dat sommige nieuwe materialen als vervanging voor PFAS-houdende O-ringen veelbelovend zijn. Er zijn echter meerdere tests nodig om aan te tonen of een onderdeel in een specifieke toepassing bruikbaar is. Het doel van het onderzoek is het vinden van materialen die ten opzichte van de huidige PFAS-materialen vergelijkbare eigenschappen hebben op meerdere van de genoemde hoofd- en detaileisen: mechanisch, uitgassing, slijtagegedrag, deeltjesproductie en chemische (plasma)stabiliteit.

Tot slot

De vervanging van PFAS-materialen in de (semiconductor-)industrie is een complexe, maar noodzakelijke stap, om de milieu- en gezondheidsrisico's te vermin-

10Ace-project

Het 10Ace-project wordt ondersteund door de Chips Joint Undertaking (onder subsidieovereenkomst nr. 101139972) en zijn leden, inclusief de aanvullende financiering door Nederland. "Gefinancierd door de Europese Unie. De meningen en standpunten die worden geuit zijn echter alleen die van de auteur(s) en weerspiegelen niet noodzakelijkerwijs die van de Europese Unie of Nederland. Noch de Europese Unie, noch Nederland kunnen ervoor verantwoordelijk worden gehouden."

deren. De komende jaren zal duidelijk moeten worden voor welke toepassing alternatieve materialen realistisch zijn. Voor een aantal complexe toepassingen in de semicon zal het een langdurige inspanning vergen om tot vervanging en/of regulering van het gebruik te komen.

Het onderzoek van TNO naar alternatieve materialen voor O-ringen is een belangrijke

eerste stap in deze richting. De aanpak voor het vinden van PFAS-vervangers, de werkwijze waarmee eisen worden vastgesteld, gemeten en beproefd, kan voor diverse andere branches ook bruikbare informatie opleveren. Door het testen en vergelijken van nieuwe materialen kunnen we uiteindelijk veilige en effectieve vervangingen voor PFAS-materialen gaan vinden, wat voor meerdere branches van belang zal zijn.

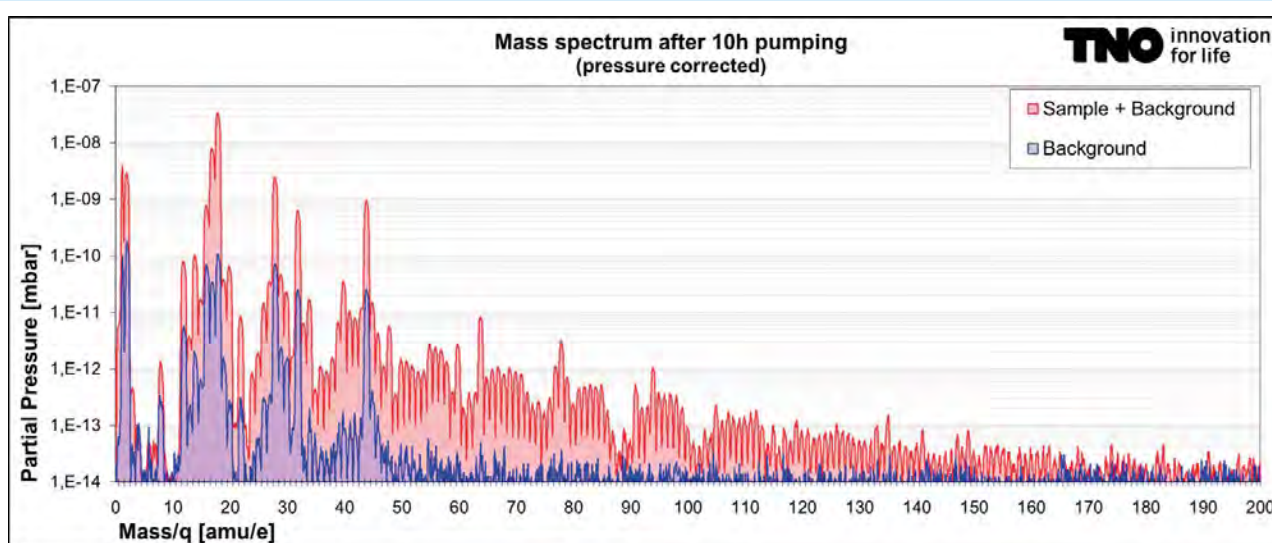
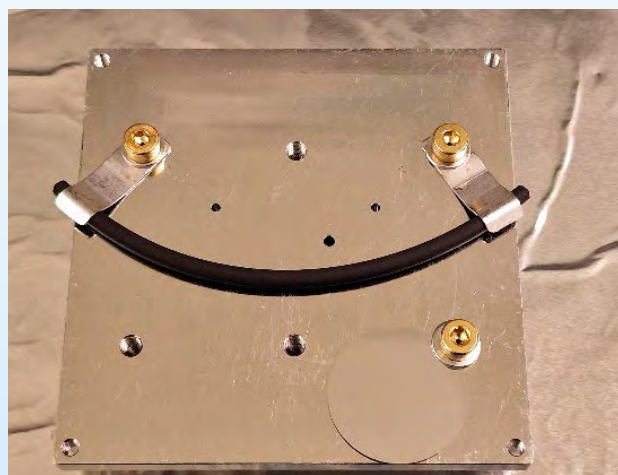
Referenties

- [1] "Risiko's PFAS voor gezondheid en milieu", RIVM, www.rivm.nl/pfas
- [2] "PFAS-Containing Articles Used in Semiconductor Manufacturing", Semiconductor Association PFAS Consortium Articles Working Group, July 31, 2023, www.semiconductors.org
- [3] "Background on Semiconductor Manufacturing and PFAS", Semiconductor Association PFAS Consortium, Article May 17, 2023, www.semiconductors.org

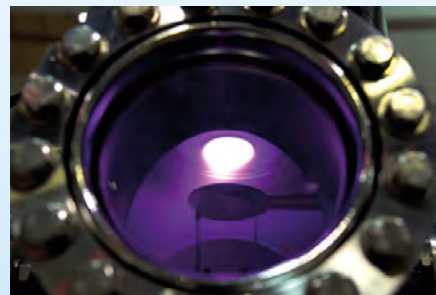
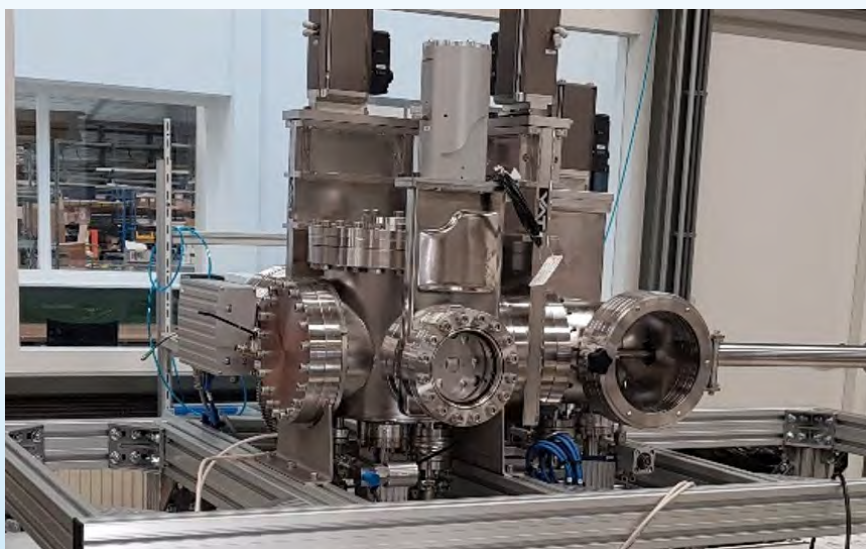
Specifieke eisen en testen voor PFAS-vervangers

Het vervangen van PFAS O-ringen in semiconductor-apparatuur is een complexe taak vanwege de uiteenlopende machines en de diversiteit van onderdelen in de machines. Ongeacht de specifieke omgeving zijn mechanische sterkte en slijtvastheid cruciaal voor O-ringen. Ze moeten hun integriteit behouden onder verschillende mechanische stresscondities, waardoor een betrouwbare afdichting gedurende langere perioden bij een specifiek temperatuurbereik wordt gegarandeerd. Dit is zeer belangrijk bij de productie van halfgeleiders, waar zelfs kleine lekken of storingen kunnen leiden tot aanzienlijke procesverstoringen en opbrengstverliezen.

In hightech-apparatuur kunnen zowel atmosferische, vacuüm- en UV/plasma-condities als relatief hoge temperaturen voorkomen. Voor de machines die onder vacuümomstandigheden functioneren, zijn reinheid, uitgassing en permeabiliteit van belang. O-ring materialen die onder deze omstandigheden worden gebruikt, moeten een lage uitgassingssnelheid hebben om vervuiling te voorkomen en ervoor te zorgen dat het vacuüm stabiel en schoon blijft. De standaard eis is dat het O-ringdeel schoon is en voorzien is van een bewezen lage restgasanalyse (RGA); zie Figuur 3.



Figuur 3. O-ring testsample en uitgassingsspectrum van het materiaal.



Figuur 4. Plasma-set-up voor de blootstelling van testsamples. (Bron foto rechts: Shutterstock)

In gebieden waar materialen worden blootgesteld aan een reactief plasma- en/of UV-licht, kan er aantasting plaatsvinden van materialen. De gebruikte materialen moeten stabiel zijn en een zekere bestendigheid hebben tegen UV- of plasmageïnduceerde schade. Plasma (Figuur 4) kan ervoor zorgen dat materialen worden afgebroken en dat er uit het vulmateriaal en afbraakproducten deeltjes vrijkomen, die het proces kunnen vervuilen en de kwaliteit van de semicon-apparatuur kunnen aantasten.

Het vervangen van PFAS O-ringen bij de productie van halfgeleiders vergt een grondig begrip van de specifieke vereisten voor elke omgeving binnen de apparatuur. De materialen worden getest onder condities die relevant zijn voor de praktijk.



The Definitive Guide to UHV and XHV

Discover Agilent solutions for ultra and extreme-high vacuum through the brand new ion pumps catalog.



Learn more: www.agilent.com/chem/vacuum
00 800 234 234 00 (toll-free)
vpt-customer@agilent.com

© Agilent Technologies, Inc. 2025

Verkiezing vicevoorzitter NEVAC-bestuur

Tijdens de ALV op de NEVAC-dag (zie pag. 18) neemt Sense Jan van der Molen afscheid als vicevoorzitter van het NEVAC-bestuur. Daarna wordt een nieuwe vicevoorzitter gekozen. Het bestuur stelt Adrie Mackus (foto) als kandidaat voor; hieronder introduceert hij zichzelf. Andere kandidaten kunnen zich tot een uur voor aanvang van de ALV melden bij voorzitter Freek Molkenboer, voorzitter@nevac.nl.



Adrie Mackus

Ik werk als universitair hoofddocent aan de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e). Mijn onderzoek richt zich op het deponeren en etsen van dunne lagen voor toepassingen in de halfgeleider technologie. Tegelijkertijd begeleid ik studenten en promovendi, en geef ik onderwijs in onze bachelor- en masteropleidingen Applied Physics.

Tijdens mijn eigen opleiding Technische Natuurkunde aan de TU/e kwam ik voor het eerst in aanraking met vacuümapparatuur. Mijn afstudeerproject ging namelijk over atoomlaagdepositie (ALD) van platina. Hiervoor gebruikten we een plasmareactor met een hoogvacuümpompsysteem. Vervolgens heb ik dit werk verder uitgebouwd tijdens een promotieproject in samenwerking met FEI Electron Optics (momenteel onderdeel van Thermo Fisher Scientific). Naast het bestuderen van de mechanismes van het groeien van edelmetalen met ALD, ging dat project over patroonvorming met elektronenbundelgeïnduceerde depositie (*electron beam induced deposition*, EBID). Bij FEI werkte ik met geavanceerde vacuümpopstellingen voor elektronenmicroscopie.

Hoewel ik tijdens deze projecten regelmatig zelf aan de opstelling sleutelde, kon ik aan de TU/e vertrouwen op de ondersteuning van de vakkundige technici in de Plasma & Materials Processing onderzoeksgroep.

Tijdens mijn postdoc aan Stanford University in de VS was die ondersteuning er niet, en dus heb ik daar vooral ook veel praktische ervaring met vacuümtechnologie opgedaan. Een van mijn taken was om kleine vacuümpopstellingen te onderhouden voor experimenten met Röntgenstraling aan de Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL). Inhoudelijk ging mijn onderzoek daar over het deponeren van ternaire materialen (materialen met drie elementen) met ALD, met een focus op de onderliggende mechanismes.

In 2016 ben ik teruggekomen naar de TU/e voor een positie als universitair docent. Zoals ik op de NEVAC-dag 2024 heb verteld [1], gaat mijn onderzoek onder meer over plaatsselectieve depositie (*area-selective deposition*, ASD). In plaats van de conventionele (top-down) combinatie van depositie, lithografie en etsen, is ons doel om materiaal enkel aan te brengen op locaties waar het nodig is [2]. Deze bottom-up-benadering maakt het makkelijker om structuren te maken op nanoschaal, terwijl het de verspilling van materiaal beperkt.

Daarnaast werken we in mijn groep aan het ontwikkelen van nieuwe processen voor plasma-geassisteerd atoomlaagetsen (ALE) [3]. Hiermee etsen we een materiaal atoomlaag voor atoomlaag, ofwel met de precisie die momenteel nodig is voor de

kleinste structuren in de nano-elektronica. Het onderzoek op ASD en ALE vindt gedeeltelijk plaats in samenwerking met de leveranciers van productiemachines in de halfgeleiderindustrie, wat uiteraard allemaal vacuümpopstellingen zijn. Naast deze toepassingsgerichte samenwerkingen ligt mijn focus op het verkrijgen van fundamenteel begrip van de fysische en chemische reacties die een rol spelen tijdens ALD, ALE en ASD. Hiervoor gebruiken we zelfgebouwde opstellingen met verschillende in-situ technieken, zoals infraroodspectroscopie en spectroscopische ellipsometrie.

Sinds een aantal jaren ben ik actief in het 'thin film committee' van de American Vacuum Society, waarin ik me vooral richt op het organiseren van conferenties in het vakgebied. Ik zou graag ook op nationale schaal willen bijdragen, binnen de NEVAC. Vanwege het belang van vacuümtechnologie voor wetenschappelijk onderzoek, maar ook voor de industrie, zie ik het als een voorname taak om de vacuümpertise in Nederland te onderhouden.

Referenties

- [1] *NEVAC blad*, jaargang 62, nummer 2, pagina 12.
- [2] *NEVAC blad*, jaargang 58, nummer 2, pagina 32.
- [3] *NEVAC blad*, jaargang 58, nummer 2, pagina 40.

6 juni, Universiteit Twente, Enschede

NEVAC-dag 2025

De NEVAC-dag 2025 vindt plaats op vrijdag 6 juni 2025 bij de Universiteit Twente (UT) in Enschede. Organisatie: Freek Molkenboer (NEVAC, freek.molkenboer@tno.nl) en Sander Smink (UT, s.smink@utwente.nl, onder vermelding van NEVAC-dag 2025)



Aanmelding

De inschrijving sluit op vrijdag 23 mei.

Meld je aan met het formulier op www.nevac.nl/over_NEVAC/NEVAC-dag.php (via de QR-code hiernaast te benaderen).



Bedrijven kunnen zich hier ook aanmelden voor de bedrijvenmarkt.

Informatie: Pieter Heidema, pieter.heidema@vacuubrand.com

Programma

- 8:45 Opbouw stands bedrijvenmarkt
- 9:15 Ontvangst met koffie en thee
- 10:00 Opening door NEVAC-voorzitter Freek Molkenboer en dagvoorzitter Kai Sotthewes (UT)
Introductie door Hans Hilgenkamp (directeur MESA+ Instituut van de UT)
- 10:10 Verrijkingsprocessen bij Urenco, Arjan Bos (Urenco)
- 10:50 Grenzen verleggen in de groei van dunne lagen met Thermische Laserepitaxie, Sander Smink (UT)
- 11:30 Uitreiking NEVAC-prijs + presentatie door de prijswinnaar, Silke Peeters (TU/e)
- 12:00 Lunch / Bedrijvenmarkt
- 13:00 Algemene Ledenvergadering NEVAC / Labtour / Bedrijvenmarkt / Uitreiking NEVAC-diploma's
- 14:00 Spreker en titel van de voordracht worden nog aangekondigd
- 14:40 Spreker en titel van de voordracht worden nog aangekondigd
- 15:20 Koffie en thee
- 15:50 Einstein Telescoop vereist vacuüm- en cryogene omstandigheden van hoge kwaliteit, Michiel van Limbeek (UT)
- 16:30 Sluiting
- 16:31 Borrel / Labtour
- 17:30 Einde NEVAC-dag

Labtour

Aan de Universiteit Twente wordt al sinds de oprichting vacuümtechnologie gebruikt in onderzoek, met verscheidene spin-offbedrijven tot gevolg. Tijdens de NEVAC-dag zijn er twee momenten waarop het mogelijk is laboratoria van verschillende vakgroepen te bezoeken. In de tours komen zowel de atomaire schaal als de kilometerschaal aan bod, en enige stappen daartussenin.

Vier vakgroepen organiseren tours rond deze thema's:

1. Oppervlaktestudies met rastertunnelmicroscopie (STM) en lage-energie-elektronenmicroscopie (LEEM)
 - Vakgroep Physics of Interfaces and Nanomaterials
 - Contact dr. Arie van Houselt
2. Gepulste laserdepositie (PLD) en atmosferische foto-elektrische spectroscopie (XPS)
 - Vakgroep Inorganic Materials Science
 - Contact prof.dr.ir. Gertjan Koster

3. Trillingsvrij koelen voor de Einstein Telescoop
 - Vakgroep Energy, Materials, and Systems
 - Contact dr.ir. Michiel van Limbeek
4. Vacuümtechniek voor extreem lage temperaturen
 - Vakgroep Interfaces and Correlated Electron Systems
 - Contact dr.ir. Sander Smink

De inschrijving voor de labtours verloopt via lijsten bij de inloop van de NEVAC-dag.

Er zijn 10-15 plaatsen per tour, waarbij geldt 'vol is vol'. Elke tour zal tweemaal worden gegeven.

Adres

Universiteit Twente
Drienerlolaan 5
7522 NB Enschede (centraal adres)

Zaal: Waaier 3 (ingang Hal B, gebouw 13)

Bereikbaarheid met OV en auto

- www.utwente.nl/contact/bereikbaarheid
- NS-station Enschede Kennispark op < 15 minuten lopen.
- Parkeren bij voorkeur op P3 of P4.



ACCLON
TECHNOLOGIES

Dé professional voor
vacuümpompen &
gloveboxen

DOOR INNOVATIE OP
WEG NAAR EEN
DUURZAME TOEKOMST



Scan voor contact

Nijverheidsweg 34 | NL-3274 KJ HEINENOORD | +31 (0) 85 273 7267 | www.acclon.nl | info@acclon.com

Verrijkingsprocessen bij Urenco



Arjan Bos
Senior Advisor - Advanced Fuels, Urenco

verrijken van de isotoop uranium-235 (U^{235}). Het verrijkte U^{235} wordt als brandstof in kerncentrales gebruikt. Voor de verrijking van uranium wordt gebruik gemaakt van de chemische verbinding UF_6 (uraniumhexafluoride) en het verrijkingsproces vindt bij zeer lage druk plaats in zogeheten centrifugescades.

Urenco is voortgekomen uit het in 1970 getekende Verdrag van Almelo, waarin de overheden van Nederland, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk de samenwerking op gebied van centrifugetechnologie hebben vastgelegd. Deze centrifugetechnologie wordt door Urenco gebruikt voor het

De centrifuge draait op zeer hoge snelheid in een vacuümomgeving en voor het opereren van de cascades onder de juiste condities gebruikt Urenco meerdere (vacuüm)systemen om de operationele condities te waarborgen en te controleren. Naast uranium verrijkt Urenco ook isotopen van andere, niet-radioactieve,

elementen. Deze isotopen zijn onder meer bedoeld voor medische toepassingen. Voor de verrijking van deze isotopen wordt dezelfde centrifugetechnologie gebruikt. Daarnaast vinden bij de betreffende afdeling (Urenco Isotopes) ook veel chemische omzettingen plaats onder vacuüm of onder inerte atmosfeer.



Een cascade van centrifuges die draaien in een vacuümomgeving.

Grenzen verleggen in de groei van dunne lagen met Thermische Laserepitaxie



Sander Smink
MESA+ Instituut voor Nanotechnologie,
Universiteit Twente

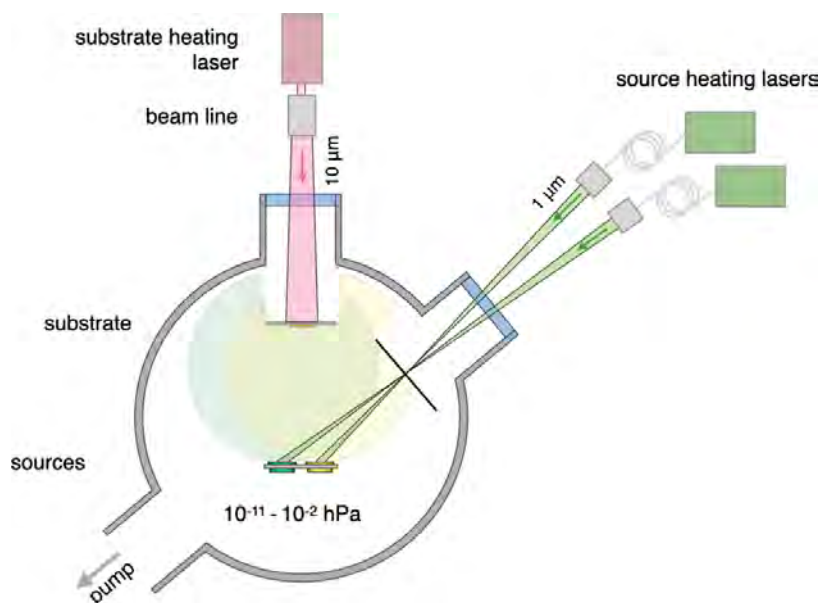
De groei van dunne lagen vormt een essentiële pijler voor een breed scala aan technologische toepassingen. Onderwerp van deze voordracht is een snel ontwikkelende nieuwe groeitechniek, Thermische Laserepitaxie (TLE). Bij TLE wordt materiaal verdampt vanuit elementaire bronnen door hun oppervlak te verhitten met continue, krachtige

lasers [1]. Deze verhitting is lokaal, wat het proces zeer efficiënt maakt en het mogelijk maakt om zeer hoge temperaturen te bereiken. Hiermee kunnen voldoende hoge dampdrukken worden bereikt voor elk element, waardoor het volledige periodiek systeem beschikbaar komt voor filmgroei [2]. Bovendien kunnen substraten worden verhit tot extreme temperaturen [3], wat onder meer kristallijne groei van materialen met hoge smeltpunten mogelijk maakt. De lokale verhitting van zowel het substraat als de bron door externe energiebronnen maakt het mogelijk bij zeer lage druk ($< 10^{-10}$ hPa) te deponeren.

Na een gedetailleerde introductie van de TLE-techniek komt een reeks recent behaalde experimentele resultaten aan de orde die de grenzen van filmgroei verleggen. Naast het ontwerp van de vacuümsystemen is er specifiek aandacht voor het deponeren van technologisch relevante materialen (bijvoorbeeld Ru, Ta en Al_2O_3) met ongeëvenaarde structurele kwaliteit [4] en de toepassing van TLE voor de groei van (complexe) oxides [5].

Referentie

- [1] W. Braun en J. Mannhart, *AIP Advances* **9**, 085310 (2019).
- [2] T.J. Smart, *et al.*, *J. Laser Appl.* **33**, 022008 (2021).
- [3] W. Braun, *et al.*, *APL Materials* **8**, 071112 (2020).
- [4] S. Smink, *et al.*, *Adv. Materials* 2312899 (2024); L.N. Majer, *et al.*, *APL Materials* **12**, 091112 (2024); *APL Materials* **12**, 091108 (2024); *J. Vac. Sci. Technol. A* **42**, 052702 (2024).
- [5] F.V.E. Hensling, *et al.*, *APL Materials* **12**, 040902 (2024).



Schematische weergave van een TLE-systeem. Door middel van continue lasers – buiten de kamer geplaatst – worden zowel substraat als bronnen verwarmd. Hierdoor wordt de temperatuur (en dus dampdruk) van niet-essentiële elementen laag gehouden en blijft het vacuüm schoner dan bij andere depositietechnieken.

Einstein Telescoop vereist vacuüm- en cryogene omstandigheden van hoge kwaliteit

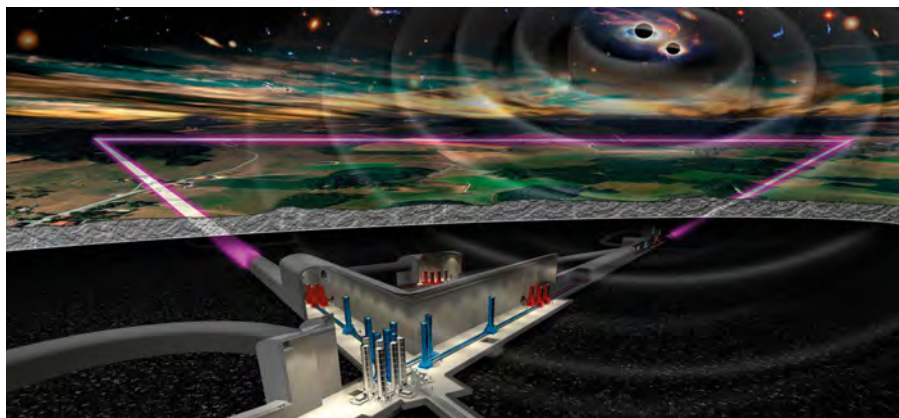


Michiel van Limbeek
Universitair docent, Universiteit Twente

het volgende-generatie GW-observatorium gaan bouwen. Deze Einstein Telescoop (ET) zal bestaan uit meerdere detectoren met een verhoogde gevoeligheid van 10^3 ten opzichte

van de huidige observatoria LIGO (VS) en VIRGO (Italië). In deze voordracht wordt besproken hoe aan deze specificaties kan worden voldaan met behulp van een ondergrondse lay-out en nieuwe optica, waarbij de focus ligt op ultrahoog vacuüm en cryogene infrastructuur. Ook aan bod komt lopend onderzoek in de context van het ET-validatielab in Maastricht: ETpathfinder.

Sinds de eerste kosmische gebeurtenis werd waargenomen met behulp van zwaartekrachtgolven (*gravitational waves*, GW's) honderd jaar na hun voorspelling in 1915 door Einstein, hebben astronomen een nieuwe modaliteit om het heelal te observeren en te bestuderen. De Europese Unie wil



Concept-agenda

NEVAC Algemene Ledenvergadering

6 juni 2025

1. Opening
2. Bestuur
3. Vaststellen van de agenda
4. Mededelingen
 - Interne en externe activiteiten bestuur
5. Conceptnotulen
6. Jaarverslagen
7. Financieel overzicht en begroting
8. Kascommissieverslag
9. Benoeming nieuwe kascommissieleden
10. Decharge bestuur
11. Bestuursmutatie
 - Uit- en inhameren
12. Rondvraag
13. Sluiting

De vergaderstukken voor de punten 5 t/m 8 zijn online in te zien, op www.nevac.nl/pdf/NEVAC_ALV_2025.pdf of via de link van de QR-code.



Word nu NEVAC-lid

en ontvang driemaal per jaar het NEVAC blad.

Andere voordelen Kosten per jaar

Contact met vakgenoten	Gewone leden € 30,-
Vakexcursies	Studenten en promovendi € 5,-
Symposia	Bedrijfsleden € 175,-

Voor bedrijfsleden U kunt zich aanmelden op
Vermelding op de NEVAC-website www.nevac.nl



Nieuwe post-HBO-opleiding Contamination Control & Cleanliness

Vereniging Contamination Control Nederland (VCCN) introduceert de nieuwe post-HBO-opleiding Contamination Control & Cleanliness. Deze opleiding speelt in op de groeiende behoefte aan schone productielijnen en eindproducten in sectoren als de halfgeleiderindustrie, life sciences, hightech productie en foodproductie. Reinheidseisen worden steeds strenger en deze opleiding biedt de integrale kennis en vaardigheden die nodig zijn om daaraan te voldoen.

De nieuwe opleiding biedt deelnemers inzicht in de verschillende contaminan-

ten die de functionaliteit van producten of processen beïnvloeden en leert hun deze te vertalen naar reinheidseisen. Met deze uitgebreide kennis zijn zij in staat om zelfstandig vragen van zowel interne als externe opdrachtgevers te analyseren. Door het stellen van de juiste vragen kunnen zij de behoeften verder verkennen. Dit leidt tot een programma van eisen waarin de reinheidseisen voor het product of proces worden gedefinieerd. De deelnemers leren deze eisen te vertalen naar de nodige maatregelen voor

de realisatie en het gebruik van een *controlled environment*.

De doelgroep omvat professionals met een afgeronde HBO-opleiding of een relevante MBO-achtergrond met voldoende praktijkervaring. De opleiding richt zich op ontwerpers, bouwers en beheerders van cleanrooms en schone productielijnen, maar is ook waardevol voor iedereen die anderszins betrokken is bij *contamination control*.

www.vccn.nl

Zes consortia ontwikkelen sleuteltechnologieën voor ET

Zes consortia van in totaal 26 Nederlandse hightech bedrijven en kennisinstellingen gaan cruciale technologie ontwikkelen voor de Einstein Telescoop (ET) of zijn daarmee al gestart. ET is het geavanceerde ondergrondse observatorium voor zwaartekrachtgolven dat mogelijk in het grensgebied van Zuid-Limburg komt. De consortia richten zich op uitdagingen in optica, vacuümtechnologie, trillingsvrij koelen, trillingsdemping en thermische deformaties. Hiervoor ontvangen zij ruim twaalf miljoen euro aan subsidie uit de Nederlandse R&D-regeling voor ET. Deze regeling is onderdeel van het ET-valorisatieprogramma voor hightech bedrijven, een programma van het Nationaal Groeifonds.

De ET-vacuümbuizen zijn in totaal 120 kilometer lang en zorgen dat lucht en stof de gevoelige metingen niet verstoren. Ook het metaal van de buizen zelf kan verontreinigingen in het vacuüm brengen, zoals stofdeeltjes of waterdamp. Het consortium Vacuümtechnologie ontwikkelt en kwalifi-

ceert procedures om buiselementen schoon en op grote schaal te produceren. Het werk bouwt voort op R&D door het Europese deeltjeslab CERN. Het consortium bestaat uit TNO, VDL ETG Technology & Development, VDL KTI, Settels Savenije Group of Companies, SBE en Nikhef.

www.einsteintelelescopeforbusiness.nl

www.einsteintelelescope-emr.eu



Kandidaat president elect IUVSTA

Dit najaar, 15-19 september, vindt in Sydney (Australië) het 23e International Vacuum Congress (IVC-23) plaats, georganiseerd door IUVSTA, de internationale unie van vacuümverenigingen. Daar komt ook de *executive council* van

IUVSTA bijeen; een van de agendapunten is de benoeming van de *president elect*, die over drie jaar de zittende president zal opvolgen. Begin februari werd tijdens een bestuursvergadering de kandidaat president elect gekozen die

in september zal worden voorgedragen. De keuze viel op NEVAC-voorzitter Freek Molkenboer (TNO).

www.iuvsta.org

www.ivc23.org

Bert Suurmeijer

Van apparatenbouwer tot boekenschrijver

Bert Suurmeijer bouwde als natuurkundig ingenieur apparaten waarin vacuüm een belangrijke rol speelde. Dat was aan de Rijksuniversiteit Groningen, waar hij ook college gaf en een tijdlang het Natuurkundepracticum leidde. “Toen ik met vervroegd pensioen ging, had ik mijn aandacht eigenlijk al veel meer bij het schrijven van boeken die andere mensen konden gebruiken om meer informatie over vacuümfysica en techniek te verkrijgen.” Hiervoor benoemde de NEVAC Suurmeijer en co-auteurs tot erelid. Maar zijn relatie met diverse NEVAC-besturen was niet altijd rimpelloos. “Gelukkig zie ik de laatste jaren weer nieuw elan in het bestuur.”

Bert Suurmeijer (1940), geboren en getogen in Groningen, is een echte ‘stadjer’. “Ik was de oudste van vijf kinderen en het was in die tijd nog geen gewoonte om te gaan studeren. Maar op het St. Maartenscollege in Haren (Jezuïetencollege) ging het zo goed dat werd gezegd: ‘Bert moet gaan studeren’. Nou, dat was iets nieuws in ons gezin.” Technische Natuurkunde trok hem, maar die studie kende de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) toen nog niet, dus zou hij naar Delft moeten. “Maar ik was net zeventien, ons gezin kende geen universitaire traditie en ik had geen enkele ervaring met

ver weg gaan en op kamers wonen. Dus dat voelde helemaal niet prettig. Daarom ben ik in Groningen Natuurkunde gaan studeren en kon ik mooi thuis blijven wonen. Maar ik weet nog dat ik in mijn ontgroeningstijd na een lange nacht een keertje ’s ochtends vroeg thuiskwam om te gaan slapen, terwijl mijn vader klaar stond om naar z’n werk te gaan: ‘Beste Bert, het lijkt mij beter dat jij op kamers gaat. Voor mij, maar ook voor jou.’ Nou, ik moest er niets van hebben, want ik had het thuis heel plezierig. Maar goed, uiteindelijk heb ik het toch gedaan, bij een aardige hospita vlak in de buurt.”

Technische Natuurkunde

Dat het in 1957 Natuurkunde werd, was overigens niet vanzelfsprekend, want Suurmeijer had zich op de open dag opgegeven voor een informatief college Scheikunde. “Ik kwam echter in de verkeerde zaal terecht, bij professor De Waard van Natuurkunde. Die had zo’n leuk verhaal dat ik toen spontaan die studie ben gaan doen.” Toen de RUG na eerdere mislukte pogingen eindelijk van Den Haag toestemming kreeg voor het opstarten van een studierichting Technische Natuurkunde, ging Suurmeijer samen met een studiegenoot meteen naar Jan Francken, de hoogleraar die was aangetrokken om de nieuwe opleiding vorm te geven. “Toen had hij twee studenten Technische Natuurkunde en kon hij een studieprogramma in elkaar zetten. Dat studieprogramma sprak ons wel aan, maar was achteraf gezien veel meer dan we aankonden. Dus toen hebben we al vrij snel beleefd gevraagd of het wat minder kon.”

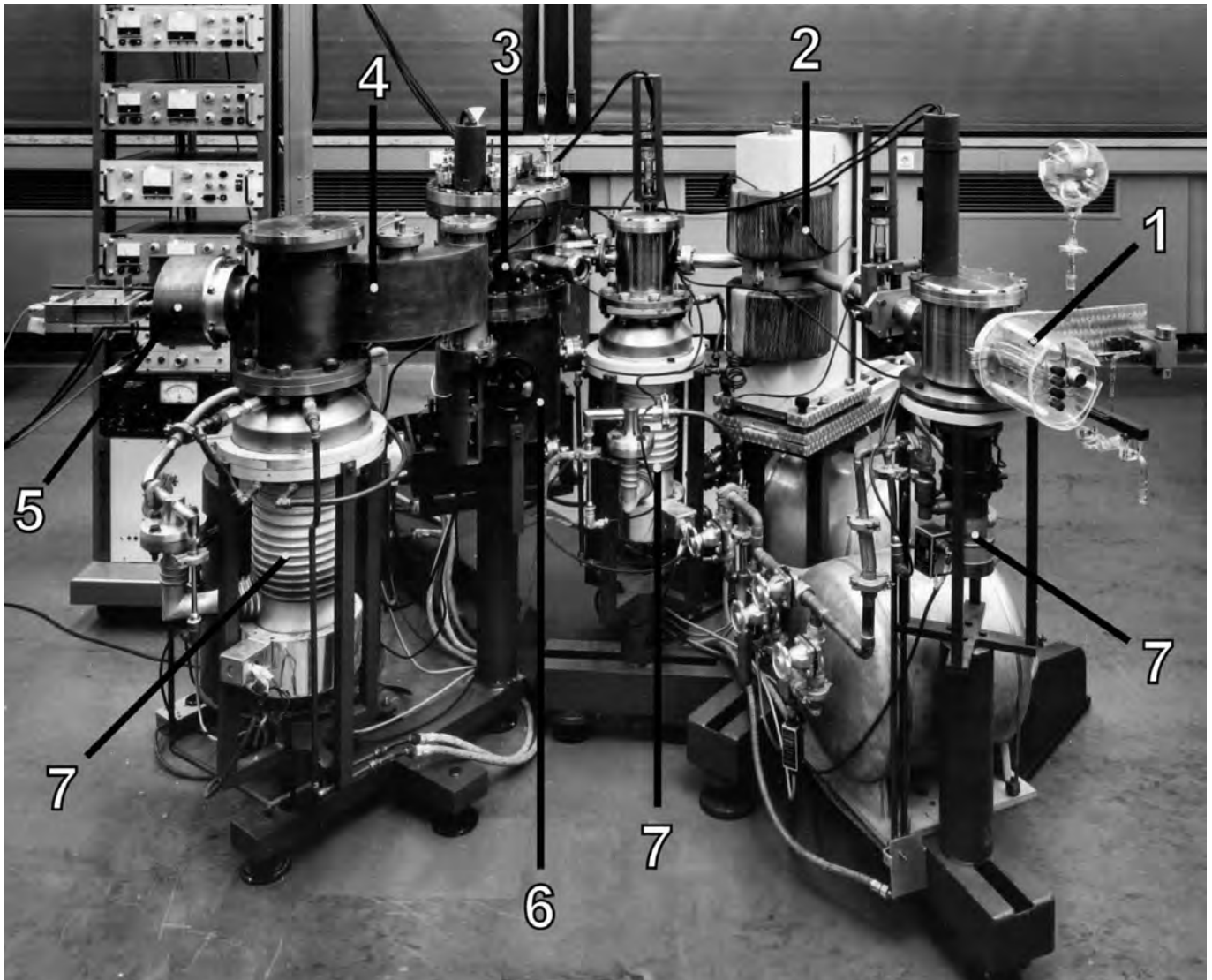
College volgen en geven

Bij Francken volgde Suurmeijer onder meer het college Vacuümtechniek. “Hij zat in de hoek van de elektronenoptica, waar je natuurlijk vacuüm bij nodig hebt,



Bert Suurmeijer in 1971 en 2011.





Verstrooiingsapparaat Suurmeijer-One.

1) Ionenbron; 2) 60° magnetische analyzer; 3) 10^{-8} Pa UHV botsingskamer; 4) 85° elektrostatistische analyzer; 5) Ionendetectorsysteem; 6) Titanium-sublimatie/sputter-ionenpomp; 7) Diffusiepompen.

en wist dus redelijk wat op dat gebied. Ik moet eerlijk zeggen dat ik later bij de opbouw van mijn eigen college het nodige aan hem heb gehad. Anderen, onder wie mijn eigen promotor Ab Boers, vonden dat hij de hele vacuümtechniek veel te mathematisch benaderde. Dus toen Boers het college van hem overnam, kreeg het een heel andere invulling, naar mijn idee echter veel te eenzijdig over de interactie tussen gas en vaste stof. Later, toen ik 'het stokje overnam' van Boers, heb ik Francken's mathematische opbouw van het college weer teruggebracht. En die aanpak heeft mij altijd aangesproken. Vacuümtechniek is uiteraard wel een heel praktisch vak, reden waarom ik ook pompen, drukmeters en allerlei an-

dere praktische zaken behandelde. Maar als aankomend natuurkundig ingenieur mag je best weten dat er de nodige fysica bij komt kijken. Zo heb ik het beste van mijn beide voorgangers overgenomen."

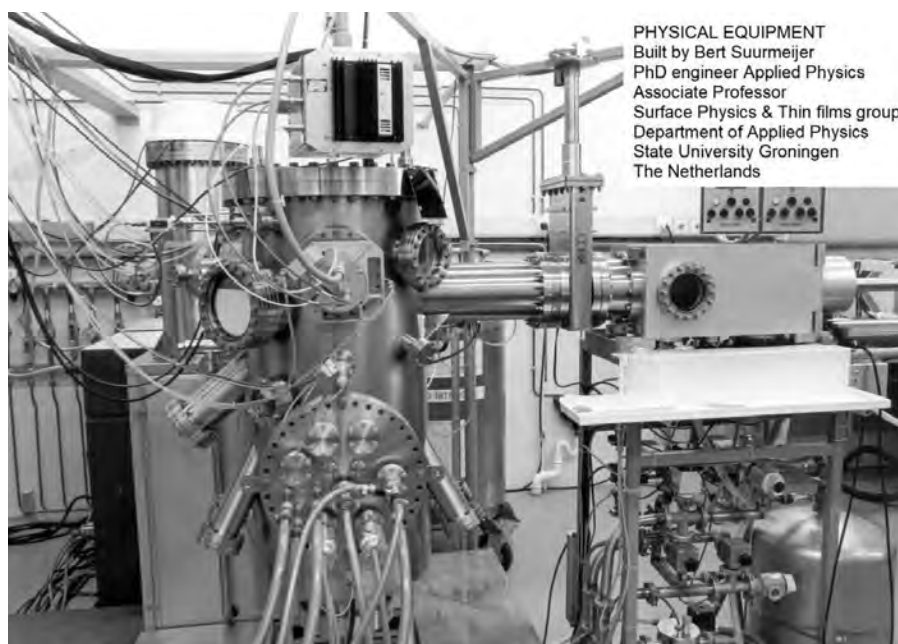
Suurmeijer-One

Na zijn afstuderen in 1965 deed Suurmeijer veel praktische ervaring op tijdens zijn promotieonderzoek in Groningen. "Ik heb een groot verstrooiingsapparaat gebouwd voor onderzoek aan de reflectie van energetische edelgasionen aan atomair schone oppervlakken. Daarom werd ik bij Natuurkunde gezien als een echte ingenieur (hij was doctorandus, totdat hij zich na een wetswijziging in 1971 officieel ingenieur mocht noemen, red.): 'Bert

was altijd aan het bouwen.'" Dat eerste apparaat ging later door het leven als de 'Suurmeijer-One'. "Ik heb het apparaat als onderdeel van mijn promotiewerk uiteraard ook zelf getest, met inleidend onderzoek aan de verstrooiing van met name argonionen aan koper. Diverse anderen hebben via onderzoek met de Suurmeijer-One hun promotie bij elkaar gemeten. Als je er nu naar terugkijkt, is het eigenlijk een heerlijk ouderwets apparaat, met diffusiepompen en zo."

Geen verstopte toiletten

Suurmeijer promoveerde in 1973 en kreeg vervolgens een vaste aanstelling als wetenschappelijk medewerker. "Later werd ik wetenschappelijk medewerker eerste klas



Opdampapparaat Suurmeijer-Two.

en vervolgens wetenschappelijk hoofd-medewerker. Zo ging dat in die tijd.” Hij deed onderzoek, begeleidde promovendi en gaf onder meer het al genoemde doctoraalcollege ‘Vacuüm Physica en Technologie’. Midden jaren tachtig vertrok zijn promotor en groepsleider Boers naar het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) in Groningen. “Hij was een echte atoomfysicus, geen oppervlaktefysicaman.” De hele groep ging mee, behalve Suurmeijer. “Dat was na lang beraad; ik voelde mij natuurkundig ingenieur en wilde op het Laboratorium voor Technische Fysica mijn functie houden. Maar ja, ik had geen mensen meer om me te helpen bij m’n onderzoek. En toen wilde Boers de Suurmeijer-One ook nog graag meenemen en zat ik dus ook zonder apparatuur.”

Precies op dat moment ging de beheerder van het Laboratorium voor Technische Fysica met pensioen en verzocht het subfaculteitsbestuur Suurmeijer om diens functie voorlopig over te nemen. “Ik kon heel goed met het technische personeel opschieten en personeelsbeheer leek mij een uitdaging, dus daar heb ik ‘ja’ tegen gezegd. Maar toen bleek dat ‘beheer’ ook over verstopte toiletten en defecte liften ging, heb ik snel aangegeven dat ik zou vertrekken zodra ik me kon aansluiten bij

een hoogleraar die onderzoek deed in een richting die ik leuk vond.”

Suurmeijer-Two

Die kans deed zich voor toen Francken in 1985 met emeritaat ging en zijn opvolger uit Delft, Teun Klapwijk, een groep Surface Physics and Thin Films ging opzetten. “Hij had belang bij een geavanceerd en universeel ingericht opdampapparaat en dat mocht ik gaan bouwen.” Dat is de ‘Suurmeijer-Two’ geworden, een apparaat voor het aanbrengen van magnetische dunne lagen ten behoeve van onderzoek naar het spingeheugen van elektronen. “Of de Suurmeijer-One met z’n ‘vieze’ diffusiepompen nog ergens staat, weet ik niet. Maar de Suurmeijer-Two, die in de periode 1986-1989 werd gebouwd, is nog steeds in werking bij de Groningse vakgroep Technische Fysica.”

Vernieuwing nodig

Klapwijk vertrok echter al snel weer uit Groningen terug naar Delft. Vrijwel tegelijkertijd kwam onverwacht de positie van practicumcoördinator Natuurkunde vrij. “Ik was al assistent bij dat practicum en zag dat het slecht werd geleid. Ik vond dat allerlei vernieuwingen nodig waren, niet alleen bij de proeven maar ook in de instructies. Daar zag ik een echte uitdaging,

dus waarom zou ik dat niet gaan doen in de laatste vijf jaar van mijn loopbaan? Ik besloot te solliciteren op de positie. Er werd mij gevraagd om een soort rapport te schrijven met mijn visie op hoe ik dat practicum zou willen inrichten, wat ik zou willen verbeteren en waarom. Dat heb ik gedaan en ja, daarop ben ik aangenomen.”

Practicumbaas

Zo heeft Suurmeijer vanaf 1996 tot 2001 nog vijf jaar gewerkt als ‘practicumbaas’. “Daar heb ik echt een heel leuke baan aan gehad. Ja, het leek me best voor vijf jaar, maar ik dacht dat het mij op de lange duur toch te eentonig zou worden. In mijn tijd is het echter nooit eentonig geweest. Ik was helemaal eigen baas en heb de job met veel plezier en enthousiasme uitgevoerd. Ik was praktisch elke avond thuis bezig, want al die practicuminstructies waren zo verouderd en ouderwets, vol met verkeerde literatuurverwijzingen. Dus daar heb ik heel veel tijd in gestoken. Mijn vrouw kan zich nog wel herinneren hoe weinig tijd ik eigenlijk voor de rest had. Diverse practicumopstellingen heb ik ook nog vernieuwd, waar mogelijk, want geld was helaas niet beschikbaar.”

Wat ontbrak was een complete opstelling waarmee studenten kennis konden maken met vacuüm. “Daarvoor heb ik met bij elkaar gesprokkelde onderdelen een nieuwe proef ontwikkeld en die wordt nog steeds gebruikt. Er waren in die tijd al redelijk wat Engelssprekende studenten. Toen ik eenmaal met pensioen was, heb ik daarom in overleg met de toenmalige studiecoördinator al die instructies vertaald naar het Engels. Die worden nu nog steeds gebruikt, althans voor zover de betreffende proeven nog bestaan.”

Studieadviseur

Vanaf eind zeventiger jaren heeft Suurmeijer in nevenfunctie ook nog gefungeerd als studieadviseur voor de studierichting Technische Natuurkunde. Vanaf 1993 werd deze nevenfunctie door het subfaculteitsbestuur uitgebreid naar ‘Studie-adviseur Natuurkunde en Technische Natuurkunde’.

“Het begeleiden van studenten bij hun studiekeuze vond ik een zeer verantwoordelijke en ook inspirerende taak.”

Boeken Vacuümtechniek

Intussen had Suurmeijer samen met Jan Verhoeven (AMOLF, zie ook NEVAC blad 2024 nr. 2) het boek *Vacuümtechniek* (VT) op MBO-niveau geschreven. Dat werd in 1989 gepubliceerd door de NEVAC. “Jan fungeerde daarbij een beetje als editor die allerlei mensen activeerde om stukken bij te dragen aan het boek. Op een gegeven moment vroeg hij mij erbij en toen ben ik daar wat in gaan rommelen, omdat er nog dingen niet helemaal waren zoals ze volgens mij moesten zijn.” Het boek werd een groot succes.

In de jaren negentig ging het echter snel met de ontwikkelingen in de vacuümtechniek. Er kwam bij de NEVAC, die ook actief was met een Commissie Opleidingen, dan ook al snel behoefte aan een update van dat boek. “Want er waren vooral veel MBO-cursisten, dus van dat boek kon veel worden verkocht. Ik wilde zelf echter heel graag een boek op HBO-/academisch niveau, dat ik in mijn eigen college kon

gebruiken. Ik had wel een dictaat, maar dat wilde ik graag vernieuwen in de vorm van een boek. Dat heeft zo een paar jaar gesudderd. Toen heb ik de knoop doorgehakt en de NEVAC voorgesteld een boek op HBO-/academisch niveau te schrijven, waarin met een kantlijn zou worden aangegeven welke stukken alleen voor hoogopgeleiden geschikt zouden zijn. Als je al die kantlijnstukken zou weglaten, moest je een MBO-boek overhouden. Ze zeiden ‘ja’, maar dan moest ik wel zorgen dat het ook zonder die kantlijnstukken een samenhangend boek zou blijven. Dat is een grote uitdaging geweest, maar het is me redelijk goed gelukt.”

Dit is het *Basisboek Vacuümtechniek* (BBVT) geworden, met Theo Mulder als derde auteur. BBVT verscheen in 2001. “Dat werd ook een bestseller, met twee herdrukken; er zijn er zo’n 3.500 van verkocht. Maar er bleef toch behoefte aan een rechttoe-rechtaan MBO-boek. Dat is toen in een later stadium alsnog helemaal geüpdatet.”

Engelstalig

Vervolgens moest er een Engelstalig boek komen, omdat er in Nederland steeds meer

Engelssprekende experts werkten en er in het buitenland geen up-to-date vacuümboek te vinden was. “Dat heeft opnieuw veel voeten in de aarde gehad. Dankzij inspanning van de toenmalige NEVAC-voorzitter Joost Frenken vonden we een uitgever en een vertaalster. Die leverde echter, na eerst een acceptabele proefvertaling, vervolgens slecht werk af. Er zaten zoveel taal- en syntaxfouten in dat ik op een gegeven moment zei: dat kan ik beter zelf, met behulp van Google Translate, dat toen nog in de kinderschoenen stond.”

De uitgever haakte af, maar uiteindelijk werd in 2015 het Eindhovense bedrijf High Tech Institute (HTI), dat veel cursussen in het Engels gaf en belang had bij een goed Engelstalig vakboek, bereid gevonden om het uit te geven. Het Engels kreeg nog een review van een goede native speaker en in 2016 zijn er van *Vacuum Science and Technology* 2.000 exemplaren gedrukt. “Inmiddels zijn er zo’n 1.000 verkocht. Dat valt wat tegen, zeker gezien de speciaal voor het boek ontworpen Engelstalige reclamewebsite. Al vind ik het anderzijds telkens weer verrassend uit welke verre oorden bestellingen komen. Het boek is intussen al negen jaar oud, maar toen ik er recentelijk weer eens een keer doorheen liep, vond ik het toch nog voldoende actueel.”

Trots

Terugkijkend is Suurmeijer zeker trots op de twee apparaten die naar hem zijn vernoemd, maar meer nog op zijn boeken. “Ik had natuurlijk al kennis van de vacuümtechniek, maar pas nadat ik er een boek over had geschreven, wist ik hoe het echt zat. Trots ben ik vooral op het Basisboek en in het verlengde daarvan op de Engelse vertaling. Dat zijn enorme uitdagingen geweest en hebben heel veel doorzettingsvermogen gevraagd.”

De eerste editie van BBVT is uitgegeven door de NEVAC en daar hebben NEVAC-bestuursleden als voorzitter Hans Niemantsverdriet en penningmeester Ton Kuiper erg bij geholpen. “Het enthousiasme wat mij toen overkwam, zie ik de



Dankzegging van de drie auteurs van *Vacuum Science and Technology* aan reviewer Sam Jimenez. Die promoveerde in de werktuigbouwkunde aan de universiteit van Bath (VK) en solliciteerde later bij het prestigieuze JET (Joint European Torus) project in Culham (VK). Toen hij meldde dat hij *Vacuum Science and Technology* had gereviewd en veel over vacuüm had geleerd, kreeg hij meteen een baan aangeboden.

laatste tijd ook weer in het NEVAC-bestuur terugkeren.” De tweede edities van VT en BBVT verschenen in 2018 en zijn door de auteurs in eigen beheer verzorgd. Bij het vinden van een uitgever voor het Engelse boek was onder anderen Dick van Langeveld nog behulpzaam.

Van WordPerfect naar Word

Het was echter beslist niet altijd rozengeur en maneschijn tussen Suurmeijer en het NEVAC-bestuur. Bijvoorbeeld rond het conflict met de dtp'er die BBVT had opgemaakt. Die had een veel te dure drukker ingeschakeld, waarop de NEVAC het traject cancelde en op zoek ging naar een goedkopere drukker. Toen het bestuur de rekening weigerde te betalen, vertikte de dtp'er om de originele bestanden af te staan. “We hadden toen alleen de pdf waarmee we het boek konden laten drukken. Dat was in 2001; in 2003 en 2008 hebben we die pdf opnieuw gebruikt voor volgende drukken. Maar uiteindelijk vond ik wel dat we dingen moesten vernieuwen. Dat was echter niet zomaar te doen, omdat we de originele bestanden niet hadden.” Suur-

meijer had wel de oude WordPerfect-files tot z'n beschikking en ging die in 2009 omzetten naar het inmiddels gangbare Word.

Wel of geen redelijke vergoeding

Het overzetten van alle formules kostte veel tijd. Over de vergoeding voor alle uren die Suurmeijer daarin had gestoken, kwam het tot een discussie met het NEVAC-bestuur. “Het bestuur zag het als onderdeel van de royalties, maar volgens mij was het gewoon opmaakwerk en daar vroeg ik een bescheiden vergoeding voor. Het bestuur bleef dit voor zich uitschuiven. Het heeft maar liefst vier voorzitters geduurd voor er in 2021 met Sense Jan van der Molen als voorzitter een oplossing kwam. Ik had kort daarvoor nog een brief met toelichting naar het bestuur gestuurd en hij pakte die na zijn aantreden meteen op. We zijn toen heel snel tot een overeenkomst gekomen. Ik kreeg de helft van de door mij gewenste vergoeding en onze boeken kwamen op de website van de NEVAC te staan. Dat zag ik als de andere helft van mijn vergoeding, want ik vond het minstens zo belangrijk dat de boeken online goed zichtbaar waren.”

Erelidmaatschap

In 2001 waren Suurmeijer en co-auteur Verhoeven al benoemd tot erelid van de NEVAC, vanwege hun buitengewone verdiensten, met name het vele werk om VT en BBVT te laten verschijnen. De derde auteur, Theo Mulder, was toen nog bestuurslid en kon niet mede door hemzelf tot erelid worden benoemd; dat kwam later alsnog. Suurmeijer was verguld met het erelidmaatschap. “Het was voor mij een grote verrassing, ik wist niet eens dat zoiets bestond. Als ik kijk naar het lijstje met ereleden, dan vind ik het een hele eer om daar ook bij te horen. Ik voelde de waardering dat ik wel wat voor de NEVAC heb betekend met onze boeken.”

Compleet aanbod

In 2021 sloten het NEVAC-bestuur en de drie auteurs een overeenkomst over presentatie van de vacuümboeken op de site van de vereniging. Dat betrof het *Basisboek Vacuümtechniek* (HBO-/academisch niveau), *Vacuümtechniek* (het MBO-boek) en het Engelse boek *Vacuum Science & Technology*. Onlangs kwamen er nog twee uitgaven online bij te staan. *Elementaire Vacuümtech-*

niek voor het VMBO-niveau en het *Oefeningenboek Vacuümtechniek*. Dit laatste boek bevat oefeningen op VMBO-/MBO- en HBO-/academisch niveau met een paar voorbeelden van de jaarlijks afgenomen NEVAC-examens ‘Elementaire Vacuümtechniek’ en ‘Vacuümtechniek’. Alle boeken zijn beschikbaar in hardback/ringband en e-book. Met uitzondering van de hardback *Vacuum*

Science & Technology (uitgever High Tech Institute) worden ze in eigen beheer uitgegeven door SUMUVER (afkorting voor Suurmeijer, Mulder, Verhoeven), onder auspiciën van de NEVAC.

www.nevac.nl/opleidingen/Boeken+vacuümtechniek.php
www.book-vacuum-science-and-technology.com



Van bake-out tot break-out

Op initiatief van TNO en NEVAC vond van 3 tot 6 februari 2025 de IUVSTA-workshop Ultra-clean vacuum plaats in Delft. Het eerste zaadje werd al geplant in najaar 2022 tijdens een bezoek aan het International Vacuum Congress van IUVSTA, de internationale unie van nationale vacuümverenigingen. Vlak voor de zomer van 2023 stelde TNO budget en faciliteiten beschikbaar om de workshop te organiseren. Met goed gevolg, want het organisatiecomité kijkt terug op een heel succesvol event. De workshop trok ruim 100 deelnemers uit alle hoeken en gaten van de vacuümwereld, uit binnen- en buitenland, en bood veel ruimte voor interactie tussen alle aanwezigen.

Hans van Dijk (TNO) en Freek Molkenboer (TNO en NEVAC), leden organisatiecomité

Programma

Een groot deel van de internationale bezoekers arriveerde al op zondag 2 februari in Delft. Voor hen was op die dag een aantal activiteiten georganiseerd om voor een warme ontvangst te zorgen. Zo was er een rondleiding bij Royal Delft, gevolgd door een schilderworkshop en een informele borrel (Foto 1). Op maandag kwamen de eerste deelnemers rond acht uur

binnendruppelen bij workshoplocatie Theater De Veste (Foto 2) en rond nege-
nen was het merendeel ingeschreven en voorzien van een name tag en goodiebag.

De deelnemers werden welkom geheten door dagvoorzitter Martin Wüest (Inficon); de dagen daarna vervulden Kees Feenstra (ASML) en Norbert Kos-



Figuur 2. De workshop vond plaats in Theater De Veste in Delft.

ter (NEVAC) die rol. Wüest gaf het woord aan Helen Kardan, director Science & Technology bij TNO High Tech Industry. In haar presentatie gaf ze aan waarom vacuüm en ultra-clean vacuüm zo belangrijk zijn voor TNO en de Nederlandse industrie. Hierna kwam Freek Molkenboer namens de organisatie aan het woord (Foto 3). Hij stond kort stil bij de aanloop naar het event en wenste iedereen een workshop met veel vragen, interactie en openheid. Na deze inleidingen kon het programma met sprekers van start.

Volgens de workshopregels van IUVSTA mag er geen gedetailleerde beschrijving worden gegeven van wat er op de dagen is besproken; dit om voor een open discussie te zorgen. Het science committee had vijftien sprekers geselecteerd, allen toppers in hun veld. Ze waren afkomstig uit vijf technologiedomeinen: halfgeleiderindustrie, ruimtevaart, big science, analysis en science in brede zin. Binnen elk domein was er vooraf kort afstemming geweest om overlap te voorkomen. De sprekers hadden in totaal een uur, waarvan ongeveer een kwartier voor vragen uit het publiek



Figuur 1. Op zondag ging de workshop al informeel van start met activiteiten bij Royal Delft Museum.



Figuur 3. Freek Molkenboer schetste namens het organisatiecomité de aanloop naar de workshop.

en discussie. Door deze opzet ontstond er na iedere presentatie een levendige discussie die vaak tot in de koffiepauzes doorliep.

Sprekers

Een kort overzicht van de sprekers en hun belangrijkste conclusies:

- Antoine Kempen van ASML gaf een historisch perspectief op ASML's reis naar vacuümtechnologie. Hij besprak de uitdagingen van het handhaven van een deeltjesvrije omgeving en de toekomstige reinheidseisen voor ASML's scanners. Hij benadrukte het belang van het minimaliseren van onderdelen in vacuüm en van het gebruik van waterstof als opvulgas.
- Delphine Faye van CNES richtte zich op verontreinigingsproblemen in ruimtetechnologie. Ze ging in op de strenge normen en testmethoden die worden gebruikt om verontreiniging in satellieten te beheersen, waarbij ze de noodzaak onderstreepte van grondige materiaaltesten op aarde en in de ruimte.
- Klaus Bergner van Vacom toonde Vacom's gestructureerde aanpak om verontreiniging gedurende de hele productieketen te beheersen. Hij benadrukte het belang van snelle voorreiniging na de productie om verontreiniging te minimaliseren.
- Stefan Hanke van KIT ging in op de vereisten voor de Einstein Telescoop, die een ultrahoog vacuüm en lage verontreinigingsniveaus vereist. Hij gaf uitleg van het gebruik van

gespecialiseerde cryopompen en uitgebreide simulaties om de spiegels van de telescoop te beschermen.

- Riens de Groot (Thermo Fisher Scientific) besprak reinheidsbeheersing in elektronenmicroscopen en benadrukte het belang van consistente materiaallevering door leveranciers. Hij besteedde ook aandacht aan de in-house reinheidseisen van Thermo Fisher Scientific.
- Yessica Brachthausen (Inficon) gaf een presentatie over RGA's (*residual gas analyzers*) en liet zien hoe de verschillende ontwerpen de gevoeligheid en het meetbereik van de RGA beïnvloeden. Ze besprak ook mogelijke upgrades voor de RGA van Inficon.
- Eleonie van Schreven van TNO deelde inzichten over productborging voor ruimte-instrumenten. Ze besprak het belang van voortdurende controles en verontreinigingsbudgetten gedurende de levenscyclus van ruimte-instrumenten.
- Paul Blom van VDL ETG presenteerde een studie over deeltjesgedrag in overgangsströmung. Hij demonstreerde een proof-of-concept met behulp van plasma om deeltjes te laden en te verwijderen. Daarbij benadrukte hij het potentieel voor innovatieve verontreinigingsbeheersingsmethoden.
- Orcun Engincan van ESA besprak de kenmerkende ESA-aanpak voor verontreinigingsbeheersing in ruimteprojecten, waarbij hij de noodzaak van strenge normen en testen benadrukte.
- Luisa Spallino van INFN ging in op de uitdaging om de vorming van H_2O -ijs op optica te beperken. Ze ging in op het gebruik van laag-energetische elektronenbundels om ijsvorming te verminderen en de ontwikkeling van een uitgassingsdatabase.
- Christian Schelle van VAT presenteerde een vacuümdeeltjesteststand die de door VAT-kleppen gegenereerde deeltjes kwantificeert. Hij deelde inzichten over deeltjesgeneratie en de mogelijkheden om kleppen vooraf te cyclussen om verontreiniging te verminderen.
- Romain Ganter van PSI legde uit hoe PSI ultrahoog vacuüm en lage lekpercentages bereikt met behulp van gespecialiseerde materialen en grondige bake-outs. Hij benadrukte



Figuur 4. Een groep deelnemers in een van de break-out sessies.



Figuur 5. De groepsfoto van de IUVSTA-workshop.

het belang van heliumlekdetectie en gecontroleerde processen.

- Paul Mertens vertelde over de essentiële bijdragen die imec met zijn research know-how leverde aan beheersing van vervuiling in de halfgeleiderwereld. Denk aan cleanroomontwikkeling, toepassing van HEPA (*high-efficiency particulate air*) filters en FOUP (*front-opening universal pod*) waferttransport.
- Véronique de Rooij (TNO) legde de basisprincipes en voordelen van XPS-analyse uit en illustreerde de veelzijdigheid ervan. Ze benoemde het belang van het gebruik van *witness samples* en het analyseren van hun reinheid – voor bestuderen van HIO (*hydrogen-induced outgassing*), monitoren van de status van opstellingen en diagnosticeren en oplossen van problemen.

Break-out sessies

De opzet van de presentaties was erop gericht de deelnemers te verleiden tot interactie. Naast de presentaties waren er twee break-out sessies (Foto 4). De deelnemers waren in groepen van ongeveer tien personen ingedeeld om een onderwerp in meer detail te bespreken. Deze onderwerpen waren geselecteerd op basis van wat deelnemers in de voor-

bereiding hadden gedeeld op hun posters. De break-out sessies werden erg goed gewaardeerd door de deelnemers; ze hadden de tijd om met elkaar een onderwerp goed te behandelen. Weliswaar werd de vrijheid van uitwisseling enigszins beperkt door overwegingen van concurrentie en vertrouwelijkheid, toch ontstonden er levendige en nuttige discussies en uitwisselingen.

Sociale en uitjes

Naast de welkommixer op zondag waren er nog drie sociale events georganiseerd. Naast de diners op maandag en woensdag was dat op woensdagmiddag een excursie. Daarvoor waren drie opties: het Rijksmuseum Boerhaave, een behind-the-scene toer bij de TU Delft en een historische toer door Delft. Op donderdag werd de workshop afgesloten met het maken van een groepsfoto van de deelnemers (Foto 5).

Waardering

Het organisatiecomité en de deelnemers (gemiddeld waarderingscijfer 8,75) waren tevreden over hoe de week was verlopen. Vanaf het begin was er een goede interactie tussen alle deelnemers en heerste er een open sfeer. Last but not least is het van belang te benadrukken dat het organise-

ren van dit event niet mogelijk was zonder de hulp van de verschillende comités:

- Science committee bestaande uit Norbert Koster (NEVAC), Martin Wüest (Inficon), Kees Feenstra (ASML) en Marcy Stutzman (Jefferson Lab).
- Partner committee bestaande uit Timo van Leent (Mikrocentrum), Wouter Jonker (DSPE en TNO), Pieter Kappelhof (DSPE en Hittech Multin), Jos Bijman (VCCN) en Remko Noor (VCCN en D2 Ontwikkeling).
- Organisatiecomité (TNO en NEVAC): Freek Molkenboer, Brigitte de Roode, Kleo Papamichou en Hans van Dijk.

En niet te vergeten de sponsors:

- High Tech Institute
- Vacom
- Thermo Fisher Scientific
- NTS
- VAT
- SPECSGROUP
- D&M
- Kurt J. Lesker
- Pfeiffer Vacuum
- Hiden Analytical

Kortom, het organisatiecomité kijkt met trots en tevredenheid terug op een geslaagde workshop.

Samenwerking en beheersing in de keten

“Wat een geweldige dag”, aldus dagvoorzitter Philip van Beek na afloop van de eerste Cleanliness Day die VCCN (Vereniging Contamination Control Nederland) organiseerde. “VCCN heeft met dit congres haar missie ‘Sharing the knowledge’ eer aangedaan.” Eindconclusie was dat om het gewenste hoge niveau van productreinheid te bereiken, samenwerking en beheersing in de gehele productieketen noodzakelijk zijn.

Jos Bijman, kennismanager VCCN

De VCCN Cleanliness Day 2025 vond op 11 maart plaats op de High Tech Campus Eindhoven. Het event bracht bijna 200 professionals, 22 bedrijven op de bedrijvenmarkt en een line-up van zeer interessante sprekers bijeen. Onder leiding van dagvoorzitter Philip van Beek (Foto 1) werden de laatste ontwikkelingen en oplossingen op het gebied van productreinheid en contaminatie-beheersing besproken.

Inleiding

Het belang van schone productiemethoden en schone ruimten zal de komende jaren beslist blijven toenemen. Zowel de openingslezing over *artificial intelligence* (AI) als de keynotelezing over de toekomst van de lithografie bevestigden dit.

Marijn Markus, managing consultant bij Capgemini (Foto 2), nam de zaal mee in de wereld van AI, de technologie achter de toenemende rekenkracht in de komende decennia. Hij toonde zeer interessante voorbeelden van wat AI op dit moment al kan, maar ook waar het vandaan komt en

wat de ontwikkeling en innovatie heeft voortgestuwd. Zo liet hij zien dat het ook een vorm van evolutie is, met name in de wijze hoe met data wordt omgegaan en wat er mee kan worden gedaan.

En moeten we bang zijn voor AI? Toen Google in 1998 begon, was dat een nieuwe manier van omgaan met data, en nu is het zelfs een werkwoord. Door de toenemende rekenkracht worden de AI-modellen beter en sneller, waardoor meer zaken mogelijk zijn; denk aan generatieve AI of bijvoorbeeld het herkennen van tumoren in een scan. Er zullen dan ook zeker revoluties in werkmethoden en toepassingen komen waar we mee moeten omgaan.

De toenemende rekenkracht, nodig voor de ontwikkeling van AI, vormde de kern van de keynote van Marc Assinck, media relations manager bij ASML (Foto 3). Met een interessante blik op de toekomst van lithografie, de productie van microchips en de ontwikkelingen binnen ASML wist hij de zaal te boeien. De Wet van Moore



Figuur 1. Philip van Beek (dagvoorzitter) in zijn openingswoord: “Ik hoop op een dag die inspireert en u wat leert.”



Figuur 2. Marijn Markus (Capgemini): “De echte revolutie is onzichtbaar.”

stond hierbij centraal: het aantal transistors op een microchip verdubbelt elke twee jaar en vergroot daarmee de rekenkracht en het aantal toepassingen. Op dit moment bevinden we ons in het tijdperk van AI en *smart mobility*. De ontwikkelingen bij ASML richten zich op het behoud van de wetmatigheid van Moore. Assinck sprak de verwachting uit dat deze ontwikkeling nog zeker twintig jaar voortduurt.

Schoon werken

Bovenstaande ontwikkelingen zorgen voor steeds strengere eisen aan de



Figuur 3. Marc Assinck (ASML):
“De productie van een wafer in een van onze machines is slechts één onderdeel van de productie van een microchip.”

gebruikte componenten en omgevingen. Kritieke processen hebben al plaats in vacuum en hoge reinheidseisen gelden ook voor de ruimte waarin wordt gewerkt en voor de componenten waaruit een high-tech systeem wordt opgebouwd. Dit hele proces van halffabrikaat tot eindproduct vraagt om een integrale aanpak. Die aanpak loopt van reinheidseisen tot maatregelen die zijn afgestemd op de eisen van de OEM'er en moeten worden uitgevoerd bij de assemblage en bij de toeleveranciers, tot in de *n*-de lijn.

Nadenken over schoon produceren

Koos Agricola, reinheidsexpert en trainer bij VCCN, (Foto 4) maakte de toehoorders bewust van de noodzaak om eerst – vóór het nemen van maatregelen – goed na te denken over de reinheidseisen, mogelijke contaminanten en blootstellingstijden van de kritieke oppervlakken. Vaak wordt te snel gekozen voor een bepaalde klasse cleanroom terwijl die wellicht niet nodig is, of voor een verkeerde reinigingsmethode die niet toereikend is.

Kortom, Agricola hield een pleidooi voor de juiste strategie voor productreinheid gedurende de gehele fabricageketen, inclusief verpakking en transport. Het door hem geschreven boek (“Strategieën Contamination Control en Productreinheid”) en VCCN richtlijn 12 (Product Cleanliness), beide verkrijgbaar bij VCCN, geven de theorie en handvatten om deze strategie vorm te geven.

Betrek hele keten bij reinheidsambitie

Frank van Otten, operation engineer Parts Precision and Clean Working bij Thermo Fisher Scientific (Foto 5), onderstreepte het belang om de juiste ambitie te hebben voor productreinheid. Bij de fabricage van een elektronenmicroscop zijn de reinheidseisen zeer streng; ze betreffen chemische, deeltjes-, oppervlakte- en vochtverontreinigingen. Zeer kleine verontreinigingen hebben al grote gevolgen voor de goede werking van het apparaat. Deze eisen worden zowel intern als extern aan de toeleveranciers gesteld. Om dit te realiseren ondersteunt het bedrijf toeleveranciers, van eerste tot *n*-de lijn, bij dit proces en vooral ook bij de keuze van de reinigingsmethoden voor *pre-cleaning*, *precision cleaning* en *high-purity cleaning*. Tot slot lichtte Van Otten het proces van high-purity cleaning uitgebreid toe.

Contamination control management strategie

Ook in de lezing van Richard Bruls, principal architect bij ASML, kwam naar voren dat ASML in het belang van productreinheid steeds meer naar de toeleveringsketen kijkt en streeft naar een nauwere samenwerking. Alleen als de gehele keten het belang ziet, is een schoon eindresultaat te bereiken. In zijn werk is Bruls met deeltjes tot 4 nm bezig. Hij schetste een trend dat terwijl het eindproduct (chips) kleiner wordt, de benodigde machines juist groter worden en er meer mensen nodig zijn voor de assemblage. Bovendien zijn in de machines meer en sneller bewegende delen aanwezig. Dit alles geeft meer risico op contaminatie en defectiviteit.

Een mogelijke aanpak is het volgen van een *contamination control management* strategie, wat staat voor het verbeteren van ontwerp-, productie- en assemblageprocessen gedurende de hele levenscyclus van het product. Dit vereist meer betrokkenheid van en een hoger kennisniveau bij leveranciers. Hiervoor is onder meer het nieuwe ASML Cleanliness GSA kader (Generic Standards ASML) ontworpen, bedoeld om de kennis in de gehele keten over te brengen.



Figuur 4. Koos Agricola:
“Als je nadenkt over het proces, heb je dan wel een cleanroom nodig?”

Checklist voor gebruik wipes

Op een ander (detail)niveau gaf Sebastian Kummert, regional sales manager bij Texwipe, een presentatie getiteld “Cleanroomdoekjes: klein doekje, grote verantwoordelijkheid”. Hij onderstreepte dat het gebruik van een checklist voor het gebruik van wipes ten behoeve van reiniging in de cleanroom geen overbodige luxe is. Volgens hem moet je deze vragen stellen voor het kiezen van de juiste wipe:

- In welke ISO klasse cleanroom wordt gewerkt?
- Waarvoor wordt de wipe gebruikt, oppervlakte- of productreiniging?
- Wat zijn de oppervlaktekarakteristieken (glad, ruw, etc.)?
- Wat is het materiaal van het oppervlak (RVS, glas, plastic, etc.)?
- Hoe groot is het oppervlak dat moet worden bestreken?
- Welk oplosmiddel wordt gebruikt?
- Wat zijn de karakteristieken van de te verwijderen contaminanten?

Naast deze checklist ging Kummert ook in op het juiste gebruik van wipes.



Figuur 5. Frank van Otten (Thermo Fisher Scientific): “High-purity cleaning beheerst de keten.”

Opleiding van belang

VCCN zorgt als vereniging voor kennis via richtlijnen en opleidingen. Harold Veldkamp, contamination control specialist bij Bronkhorst, heeft hier indertijd als nieuwkomer binnen het vakgebied veel aan gehad. Na indiensttreding bij Bronkhorst werd hij verantwoordelijk voor schoon produceren. In het proces om hier toe te komen, heeft hij veel geleerd en dat deelde hij in zijn presentatie met de aan-

wezigen. Zoals een totaalplan voor schoon produceren dat zich kenmerkt door:

- breedgedragen commitment in het hele bedrijf;
- focus op het doel;
- juiste fasering;
- tijdspad;
- bewustwording zowel intern als extern.

Voor Veldkamp was het een leerzaam en doorlopend proces van bewustwording,

procesbeheersing en gezond verstand.

Bedrijvenmarkt

Tijdens de pauze en het drankje na afloop was er voldoende ruimte om elkaar te ontmoeten en kennis te maken met de getoonde producten bij de bedrijven; zie Foto 6. De sfeer was gemoedelijk en VCCN kijkt terug op een geslaagd congres.

www.vccn.nl



Figuur 6. Impressie van de VCCN Cleanliness Day 2025.

Nieuwe schroefpomp voor het laboratorium

Vacuümschroefpompen hebben zich in de techniek van het maken van vacuüm al ruimschoots bewezen. Belangrijk is dat het een droge technologie is zonder bijkomende chemische en deeltjescontaminatie ten gevolge van slijtage. Er kan een vacuümdruk worden bereikt in het gebied van 10^{-3} mbar. Een nieuwe ontwikkeling heeft geleid tot een pomp met een hoge chemische bestendigheid en hoge waterverdraagzaamheid, voor bij een vacuümvoven of een vriesdroogapplicatie in een laboratorium.

Pieter Heidema, technical sales manager Vacuubrand

Inleiding

Vacuümtechnologie is een onmisbaar onderdeel geworden van hedendaagse onderzoeks- en analyselaboratoria. Processen zoals filtratie, verdamping of vriesdrogen kunnen alleen efficiënt en gecontroleerd worden uitgevoerd met vacuüm als belangrijk hulpmiddel. De toepassing bepaalt de specifieke eisen voor de vacuümapparatuur.

Al sinds de jaren tachtig worden droge chemie-membraanpompen gebruikt in laboratoria. Ze maken een vacuüm tot ongeveer 1 mbar mogelijk, wat echter niet voldoende is voor veel applicaties. Voor een nog dieper, schoon vacuüm zijn er de droge schroefvacuümpompen, kortweg schroefpompen. Deze zijn

geschikt voor procesdrukken tot 10^{-3} mbar vacuüm. De van origine industriële pompen waren echter lange tijd niet beschikbaar voor de laboratoriumschaal of in een bijzonder chemisch bestendig ontwerp.

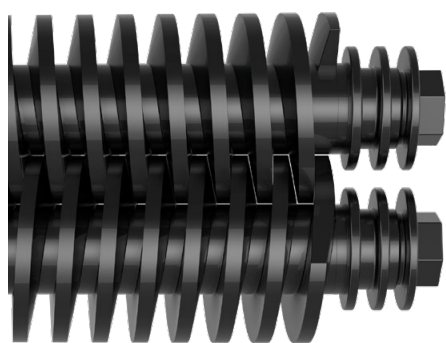
De voortdurende trend naar hogere productzuiverheid en schonere procesbeheersing leidt tot hogere eisen aan de vacuümpomptechnologie voor in het laboratorium. De schroefpomp voldoet aan deze kerneisen, door bij te dragen aan een contaminatievrij proces zonder olie en slijtagedeeltjes. Voor processen met agressieve gassen en dampen is een hoge chemische bestendigheid ook een basisvereiste. In deze gevallen zijn aanvullende chemisch bestendige pomp-

technologieën nodig om een soepele en duurzame werking te garanderen.

Droge schroefvacuümpompen

Schroefpompen voor het opwekken van vacuüm behoren tot de groep drooglopende pompen en werken volgens het roterende verdringingsprincipe, net als bijvoorbeeld de Rootspomp. De oorsprong van dit principe is de Archimedischeschroef, oorspronkelijk een wateropvoerapparaat uit de oudheid met een draaiende schroef als transport- en opvoerinrichting. De huidige schroefpompen voor het opwekken van vacuüm transporteren gas in plaats van water en binnenin bevinden zich – in plaats van een schroef – twee roterende verdringers, of rotors, die tegen elkaar indraaien en in elkaar genest zijn als tandwiel. Daarom behoort de schroefpomp tot de roterende verdringerpompen met twee assen. Deze rotoren worden vanwege hun uiterlijk schroeven, spiralen of spindels genoemd.

Het principe van de schroefpomp is gebaseerd op gastransport in een spleet-afgedichte kamer, met spleten tussen de rotoren onderling en tussen de rotoren en hun cilindervormige statorbehuizing. De twee roterende spindels grijpen zonder contact in elkaar en vormen samen met de omsluitende stator ver-



Figuur 1. Twee roterende spindels grijpen zonder contact in elkaar en vormen samen met de omsluitende stator verschillende kamers.



Figuur 2. Lagering van de spindels met ophanging aan één uiteinde.

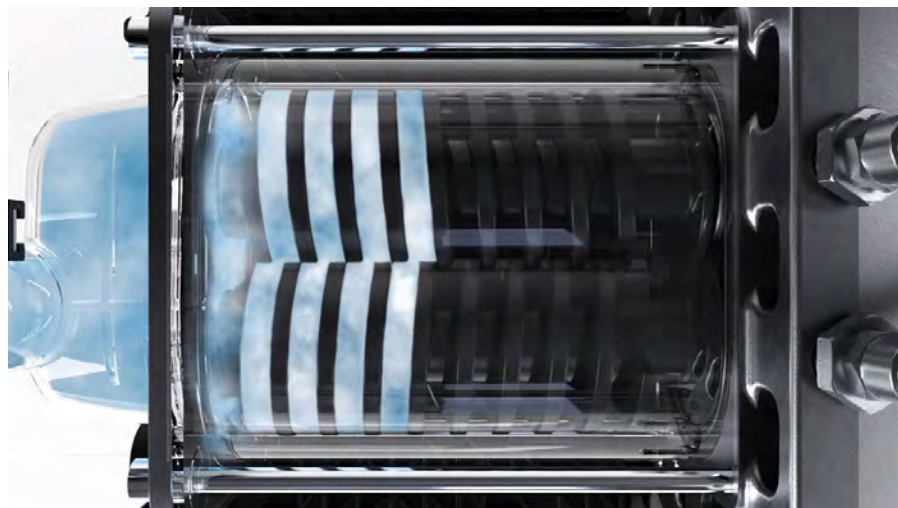
schillende kamers (Figuur 1). De zeer nauwe tolerantie tussen de spindels ligt in het micrometerbereik. Terwijl de spindels synchroon in tegengestelde richtingen draaien, transporteren de kamers het gas. Langs de as van de spindel ontstaat een massastroom van de inlaat aan de zuigzijde naar de uitlaat aan de drukzijde.

Vanwege de warmte die tijdens dit proces wordt gegenereerd, hebben schroefpompen temperatuurregeling nodig door middel van koelvloeistof of koellucht, zodat de toleranties tussen de draaiende spindels en de behuizing niet veranderen. De reden hiervoor is dat het te bereiken eindvacuüm voornamelijk wordt bepaald door zowel de spleetafmetingen in warme toestand als de mechanische eigenschappen van de vloeistof. De pompsnelheid daarentegen wordt onder meer bepaald door de grootte van de spindels en hun rotatiesnelheid, die op hun beurt de afmeting van de pomp bepalen. Hierbij geldt: hoe groter de vereiste pompsnelheid, hoe groter de pomp.

Algemene voordelen

Droge schroefpompen voor de vacuümtechniek zijn al wijdverspreid in sectoren als chemie, farmacie en halfgeleiderfabricage. De afwezigheid van olie is een groot voordeel. Bovendien zijn schroefpompen veelzijdig door de variabiliteit in vacuümdruk en het brede scala aan pompsnelheden. Afhankelijk van het pompmodel varieert de vacuümdruk tussen omgevingsdruk en 10^{-3} mbar. Daarom zijn schroefpompen beschikbaar voor toepassingen in zowel grof vacuüm (tot 1 mbar) als fijn vacuüm (tot 10^{-3} mbar). Daarnaast zijn ze geschikt als backingpomp voor turbomoleculaire pompen en voor andere toepassingen met betrekking tot hoog- en ultrahoogvacuümtechnologie. De pompsnelheid van schroefpompen varieert van enkele m^3/uur tot enkele duizenden m^3/uur , afhankelijk van de toepassing.

Schroefpompen worden ook gekenmerkt door hun lage onderhoudsvereisten.



Figuur 3. Demonstratie, in close-up en overzicht (rechts), van gastransport in de nieuwe VACUU-PURE® 10C van Vacuubrand.

De spindels lopen contactloos in elkaar over, wat slijtage voorkomt. Ze bevatten ook geen afdichtingen in de werkkamer die kunnen slijten. Bovendien hebben schroefpompen geen olie in de carter van de pomp. Daarnaast zijn er andere kenmerken, zoals de spoed van de spindels, waarmee het werkingsgedrag kan worden aangepast aan de gewenste toepassing. Als alle kamers even groot zijn, is sprake van een pomp met constante spoed. Bij varianten met variabele spoed neemt de grootte van de kamers af in de richting van de uitlaat, wat resulteert in compressie. Schroefpompen met variabele spoed verbeteren de thermodynamische eigenschappen; er is minder warmte- en geluidsontwikkeling. Schroefpompen met een constante spoed hebben echter een hogere condensaatolerantie, wat voordelig is voor processen met oplosmiddelen.

Laboratoriumuitvoering

Recente ontwikkelingen op het gebied van schroefpompen maken het mogelijk om deze vacuümtechnologie ook in het laboratorium te gebruiken. De in de industrie veel gebruikte schroefpomp heeft een lagering waarbij de beide uiteinden van de spindels worden gelagerd. Door de schroefspindels korter te maken en met de lagering als cantilever op te hangen (Figuur 2), kan men een kleinere pomp bouwen met het schroefprincipe. Er wordt geen gebruik gemaakt van een normale

tandwieloverbrenging voor de tegengesteld draaiende spindels, maar een magnetische tandwieloverbrenging. Hierdoor kan er zeer compact worden gebouwd en is de smering van tandwielen verdwenen. Vacuubrand heeft nu een nieuwe schroefpomp geïntroduceerd waarmee de algemene voordelen van de veelzijdige schroefpomptechnologie verder zijn aangevuld met gerichte ontwerpverbeteringen, specifiek voor gebruik in het laboratorium. De droge schroefpomp in chemisch bestendige uitvoering, de VACUU-PURE® 10C (Figuur 3), is ontworpen voor toepassingen en processen die chemisch bestendige, condensaatcompatibele en absoluut olievrije vacuümpompen vereisen.

Hoge chemische bestendigheid

Om ervoor te zorgen dat de nieuwe schroefpomp bijzonder robuust is tegen agressieve gassen en dampen, zijn voornamelijk chemisch resistente kunststoffen toegepast. Deze zijn uitstekend bestand tegen de meeste chemicaliën. Ze beschermen de zeer kwetsbare onderdelen, zoals de spindels en stator in de pomp, die in direct contact staan met de verpompte chemicaliën. Het is van cruciaal belang dat dit niet slechts dunne coatings zijn, maar dikwandige omhulsels met robuuste PEEK-kunststof. In veel gevallen is er dan geen koudeval nodig om de schroefpomp te beschermen.



100% olievrij

Voor absoluut schone processen en zuivere producten is de nieuwe schroefpomp ontworpen met vrijdragende spindels en magnetische tandwielen. Dankzij de vrijdragende lagering, en de zeer nauwkeurige uitlijning van de spindels, zijn ondersteunende lagers in de werkkamer niet nodig – en dus ook geen smeermiddelen die anders het vacuümproces zouden kunnen binnendringen. De magnetische tandwieloverbrenging vermijdt ook olie-smering, waardoor ongewenste reacties met procesmedia of terugdiffusie in de werkkamer zijn uitgesloten.

Hoge condensaatcompatibiliteit

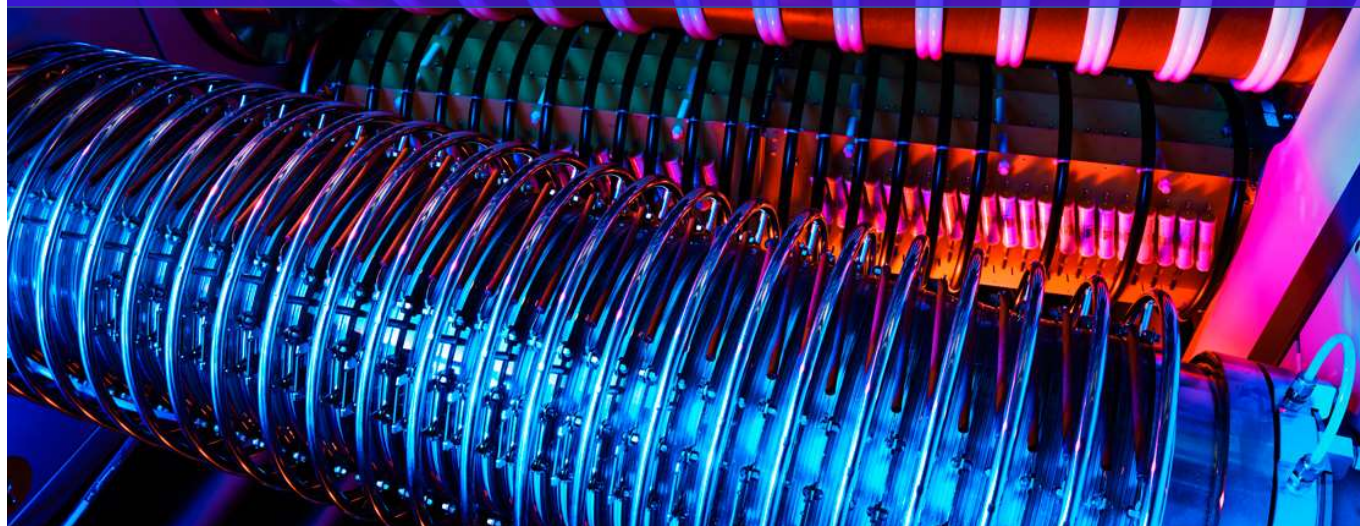
Bij de pomptontwikkeling is gekozen voor een constante spoed van de spindels. Dit leidt tot een hoge condensaatcompatibiliteit, bijvoorbeeld bij het gebruik van oplosmiddelen. Een geïntegreerde rege-

neratiemodus zorgt ervoor dat de vacuumpomp snel droog is na het einde van het proces. Daardoor kan de pomp snel weer in gebruik genomen worden en neemt de doorvoer van monsters toe.

Tot slot, een ander voordeel van de nieuwe VACUU-PURE schroefpomp is het luchtkoelsysteem, dat een koelwateraansluiting overbodig maakt en dus extra flexibiliteit biedt op de plaats van gebruik.

www.vacuubrand.com

Zoek jij een technische functie in een innovatieve high-tech werkomgeving?



MBO – HBO – WO
Scan & solliciteer bij
High Voltage Engineering Europa B.V.



Stel je voor: Jean-Baptiste Thouvenin

Jean-Baptiste Thouvenin werkt nu als onderzoeker met de EBL2 bij TNO. Hij zat eerder bij ESRF en daarna ESTEC: "Ik verruilde toen ultrahoog vacuüm voor ultragrote vacuümkamers."



Hij studeerde materiaalkunde in Frankrijk en verwonderde zich over de E-10 en E-11 mbar bij de European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble. Vervolgens werkte hij aan de Large Space Simulator bij ESTEC in Noordwijk. "Het was fascinerend om vlakbij een ruimtevaartuig bezig te zijn dat nu zo ver in de ruimte onderweg is." In 2022 ging hij naar TNO om met de EUV Beam Line 2 (EBL2) onderzoek te doen naar de levensduur van EUV-optica. Jean-Baptiste Thouvenin stelt zich voor.

Aan de Université Jean Monnet in Saint Etienne (Fr) studeerde Jean-Baptiste Thouvenin materiaalkunde, met als hoofdvak oppervlaktebehandeling. "Het zette me aan om op zoek te gaan naar schonere, efficiëntere manieren om oppervlakken te verbeteren. Ik ging ervan uit dat vacuüm een van de antwoorden was. Deze opleiding was de enige in Frankrijk die zicht richtte op de twee onderwerpen vacuümtechnologie en materiaalkarakterisering."

Enthousiasme voor vacuüm

Na de studie begon Thouvenin zijn loopbaan bij rollagerfabrikant NTN-SNR in Annecy (Fr) als laborant metaalkunde voor oppervlaktebehandeling. In 2016 stapte hij over naar de European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble (Fr). "Ik verruilde het meer van Annecy voor de hellingen van Grenoble om bij ESRF vol enthousiasme terug te keren naar de vacuümwereld. Daar kon ik de vacuümtheorie echt in de praktijk brengen. Met een twinkeling in mijn ogen verwonderde ik me over de E-10 en E-11 mbar die ik op de displays zag. Ik leerde er over de evenwichtsoefening tussen het onderhouden en het bedienen van een systeem op het ritme van de shutdowns."

Bake-out op maat

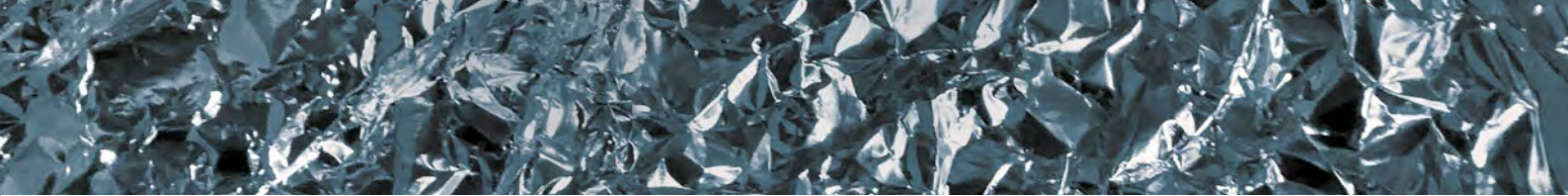
Op dat moment bevond ESRF zich in de laatste fase van een ambitieus upgradeprogramma, dat de uitwisseling van 844 meter aan vacuümkamers en bijbehorende magneten vereiste. "Dat was een indrukwekkend project. Een van de opdrachten waaraan ik werkte, was de ontwikkeling van een op maat gemaakt bake-outsysteem. Met het nieuwe ontwerp kromp de afstand tussen de vacuümkamer en de pool van de magneten tot slechts enkele millimeters. Om bake-out in situ te kunnen uitvoeren, moesten we een methode ontwerpen om een verwarmingsdraad te vormen en op zijn plaats te houden in een vacuümkamer, zonder de magneeteigenschappen te verstoren."

Ultragrote vacuümkamers

In 2019, toen de upgrade gaande was, vertrok Thouvenin naar het European Space Research and Technology Centre (ESTEC). "Ik ging van de bergen van Grenoble naar de winderige kust van Noordwijk. Deze keer behield ik mijn connectie met vacuüm doordat ik thermisch vacuümtechnicus werd voor European Test Services (ETS), dat voor ESA (European Space Agency, red.) de faciliteit van ESTEC runt. Daar verruilde ik ultrahoog vacuüm voor ultragrote vacuümkamers zoals de Large Space Simulator, waarin een autobus past om deze op cryogene temperaturen te brengen. Ik werkte aan de thermische vacuümtest voor ESA's JUICE-programma (Jupiter Icy Moons Explorer, red.). Werken vlakbij een ruimtevaartuig dat nu zo ver in de ruimte onderweg is, was een fascinerende ervaring."

Generale repetitie voor lancering

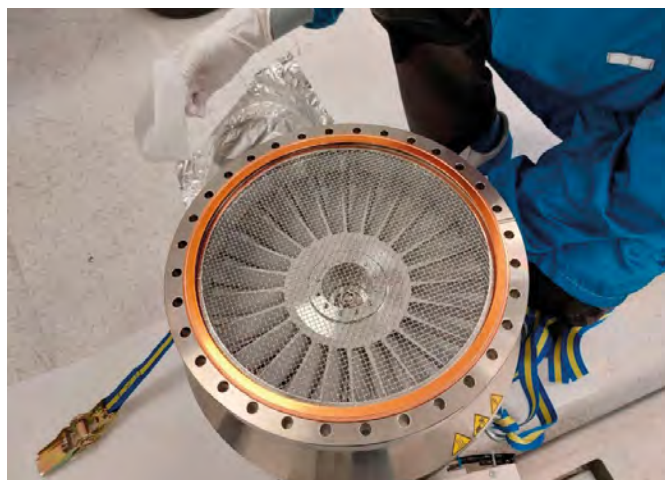
Thouvenin moest niet alleen wennen aan een nieuw land maar ook zijn focus aanpassen. "Vacuüm was niet het einddoel, maar een hulpmiddel om ruimtetesten op de grond mogelijk te maken. Het was een inspirerende ervaring om in en met zulke imposante vacuümkamers te werken."



Van het testen op lekkages in cryogene lijnen tot het schoonmaken van vervuilde cryo-panelen, ik bleef leren over vacuümtechnologie. Elke testcampagne voelde een beetje als een generale repetitie voor de echte lancering. Alleen werden er vacuümpompen gebruikt in plaats van raketten.”

Heel afwisselend werk

In 2022 ging hij naar TNO, waar hij nu als onderzoeker werkt bij de afdeling Semicon Equipment Lifetime (SEL) in Delft. “Momenteel zijn mijn activiteiten gericht op onze EUV Beam Line 2 (EBL2). Ik verdeel mijn tijd meestal tussen onderhouds- of upgradeactiviteiten en klantprojecten. Van het upgraden van



Inspectie van een turbopomp voor revisie.

SEL en EBL2

Geavanceerde lithografieapparatuur werkt onder uitdagende omstandigheden, van EUV-fotonen, gasstromen, plasma en hoogvacuüm tot deeltjes en potentiële degradatie. Om ervoor te zorgen dat lithografieapparatuur zo lang mogelijk zijn precisiewerk kan blijven doen, verzorgt de onderzoeksgroep Semicon Equipment Lifetime (SEL) van TNO levensduurstudies en biedt diepgaand inzicht in beheersing van de levensduur van apparatuur.

De EUV Beam Line 2 (EBL2) is bij TNO ontwikkeld voor de studie van de levensduur van materialen, waaronder EUV-optica voor de nanolithografie-industrie. EBL2 beschikt over regelingen voor temperatuur, gasomgeving en achtergronddruk en verschillende metrologietools, waaronder EUV-fotodiodes, scintillator, ellipsometer, infraroodcamera, temperatuursensoren, restgasanalyse en ionen-/radicalenfluxdetectoren.



De EUV Beam Line 2 (EBL2) van TNO.

ons pompsysteem tot het ontwikkelen van een aangepaste monsterhouder die compatibel is met HIO-vereisten (HIO = *hydrogen-induced outgassing*, red.) en onze belichtingskamer, mijn werk is heel afwisselend.” Zonder vacuüm is er geen EUV, verklaart Thouvenin. “Dus behelst een groot deel van mijn activiteiten het creëren en onderhouden van de condities voor mijn werk met onderdelen die in vacuüm moeten presteren of met de componenten van vacuümsystemen. Hiervoor hanteren we bij elke stap van ons proces strenge eisen voor beheersing van contaminatie en reinheid.”

Netwerk van gelijkgestemde experts

Thouvenin is zeer bewust lid geworden van de NEVAC. “Als buitenlander vind ik het belangrijk om deel uit te maken van een netwerk van gelijkgestemde experts in het land waar ik woon en werk. Ik geloof dat ik nieuwsgierig moet blijven en op de hoogte moet blijven van wat er gebeurt op en om het gebied van vacuümtechnologie. Om innovatief te blijven, moeten we streven naar verbetering en zoeken naar oplossingen die buiten de gebaande paden liggen.”

Verbinding tussen vacuümverenigingen

Derecente IUVSTA-workshop (mede door NEVAC georganiseerd; zie het verslag elders in dit nummer) is hem goed bevallen. “Sinds ik daaraan heb deelgenomen, heb ik echt het gevoel dat meer interactie met collega's nuttig kan zijn om samenwerking te bevorderen en nieuwe ideeën op te wekken. Een format daarvoor zou kunnen zijn fabrieksrondleidingen in combinatie met break-outsessies.” Tot slot: Als Europees onderzoeker zou ik me meer willen richten op het versterken van de verbinding tussen de verschillende vacuümverenigingen, te beginnen met het ontwikkelen van samenwerking (van de NEVAC, red.) met de Franse vacuümvereniging.”

Hoe virtueel lek is een boutverbinding?

In vacuümsystemen zijn boutverbindingen niet weg te denken. Een bout in een blindschroefdraadgat is echter 'not done'. Dit kan namelijk problemen opleveren bij het afpompen van het systeem en dus de uiteindelijke vacuümprestatie beïnvloeden. Maar hoe slecht is het nu als er toch een standaardbout in een blind tapgat binnen de vacuümruimte wordt gemonteerd?

Kees van Oosten, ontwikkelingstechnicus Fijnmechanische Dienst, Universiteit Leiden

Een virtueel lek is een afgesloten holle ruimte waarin gasmoleculen gevangen zijn en waaruit ze langzaam vrijkomen, wat het snel bereiken van een goed vacuüm bemoeilijkt. In een boutverbinding kan dit lek op meerdere plaatsen aanwezig zijn: in het boutgat, op de schroefdraadflanken of in de ruimte tussen bout en onderdeel.

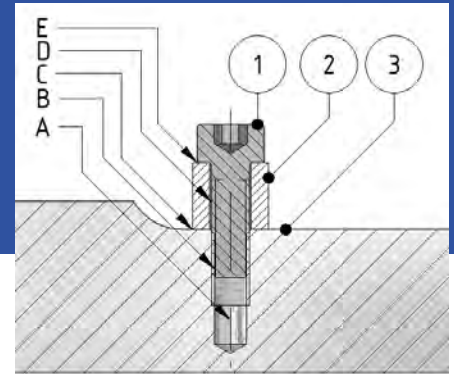
Dit roept de vraag op welke mogelijke boutverbindingen toepasbaar zijn in vacuüm.

En wat valt er te zeggen over de 'afpompbaarheid' van het 'virtuele lek'?

Vijf zwakke plekken

Een traditionele boutverbinding (Figuur 1) bestaat uit:

1. De bout.
2. Het te bevestigen onderdeel.
3. De basis met schroefdraadgat.



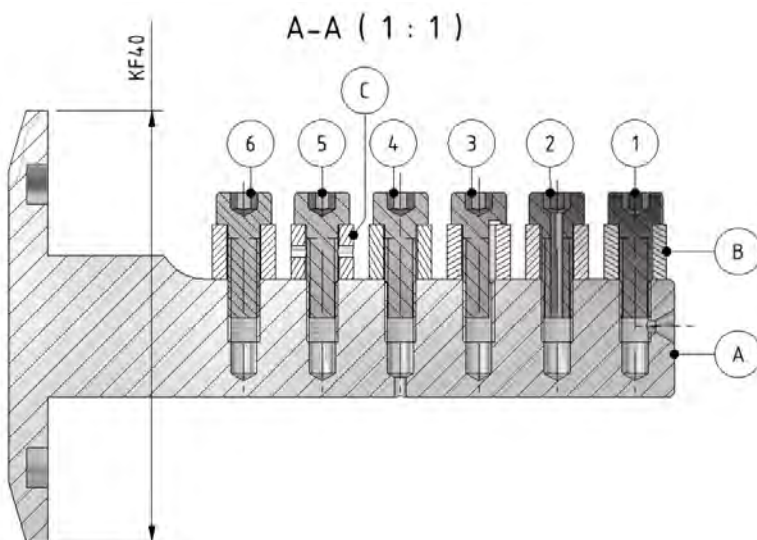
Figuur 1. Schematische weergave van een boutverbinding met drie onderdelen en vijf mogelijke lekpunten (A t/m E).

In deze beschouwing zijn de sluit- en/of veerringen en het gebruik van een moer in plaats van een schroefdraadgat niet meegenomen. In een boutverbinding kunnen dan vijf locaties een virtueel lek vormen (Figuur 1):

- A De bout is gemonteerd in het tapgat en dat vormt een virtueel lek.
- B De bout en het draadgat hebben draadflanken; door toleranties in beide onderdelen vormt dit een helix, wat ook een virtueel lek introduceert.
- C Het onderdeel (2) dat op de basis (3) wordt gemonteerd, vormt een oppervlaktecontact tussen de basis en de boutkop, wat virtueel lek (C) en (E) vormt.
- D Als laatste vormt de speling tussen bout en onderdeel een opgesloten ruimte, en dus ook een virtueel lek.

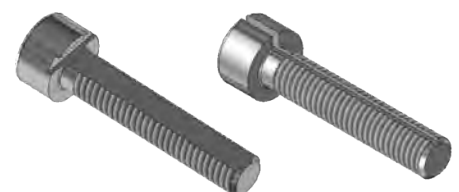
Mogelijke oplossingen

Om het effect van virtuele lekken te minimaliseren, zijn verschillende boutconfiguraties constructief aangepast. Figuur 2 laat een testplug (A) zien met een zestal mogelijke oplossingen die één voor één zijn getest.

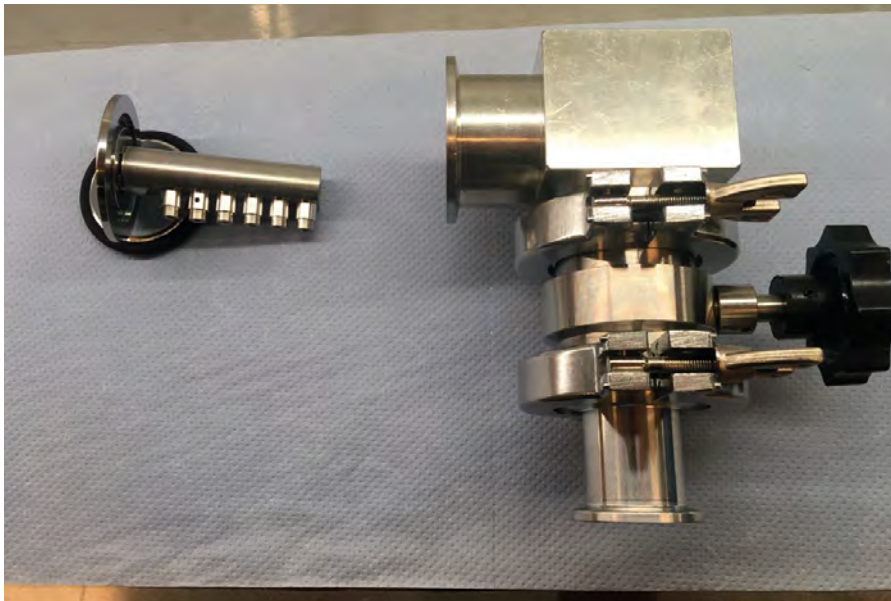


Figuur 2. Zes mogelijke boutoplossingen.

- 1 Standaardverbinding waarbij de onderzijde van het tapgat via de zijkant open is.
- 2 Oplossing waarbij centraal in de bout een ontluchtingsgat is aangebracht.
- 3 Platte kant op de schroefdraad van de bout tot de kerndiameter weggefreest en een groef onder de boutkop aangebracht (Figuur 3).
- 4 Gelijk aan bout 1, alleen met het ontluchtingsgat aan de onderzijde aangebracht.
- 5 Ontluchtingsgaten in onderdeel C.
- 6 Geen aanpassingen aan de boutverbinding voor vacuümtoepassingen.



Figuur 3. Mogelijke oplossingen voor bout 3 uit Figuur 2: afgevlakte draadflanken (links) of een zaaggleuf (rechts).



Figuur 4. Deel van de opstelling voor de heliumlekttest.

De twee ordes grotere lekkage bij bout 6 bevestigt dat een standaardboutverbinding zonder vacuümaandacht slecht of helemaal niet geschikt is. Om een beeld te geven is voor deze bout de tijdsduur bijna twee keer zo lang genomen, waarna na ongeveer 250 sec de leksnelheid in de orde van 10^{-8} - 10^{-10} [mbar·l/s] kwam.

Bout 1 t/m 4 lossen het virtuele lek werkelijk op en geven daarom het beste resultaat. Bout 3 presteert het beste qua afpompbaarheid, omdat het virtuele lek bij de schroefdraadflank wordt afgepompt. Maar sterktechnisch valt te betwijfelen of deze optie is aan te bevelen, zeker omdat die niet significant beter is dan opties 1, 2 en 4.

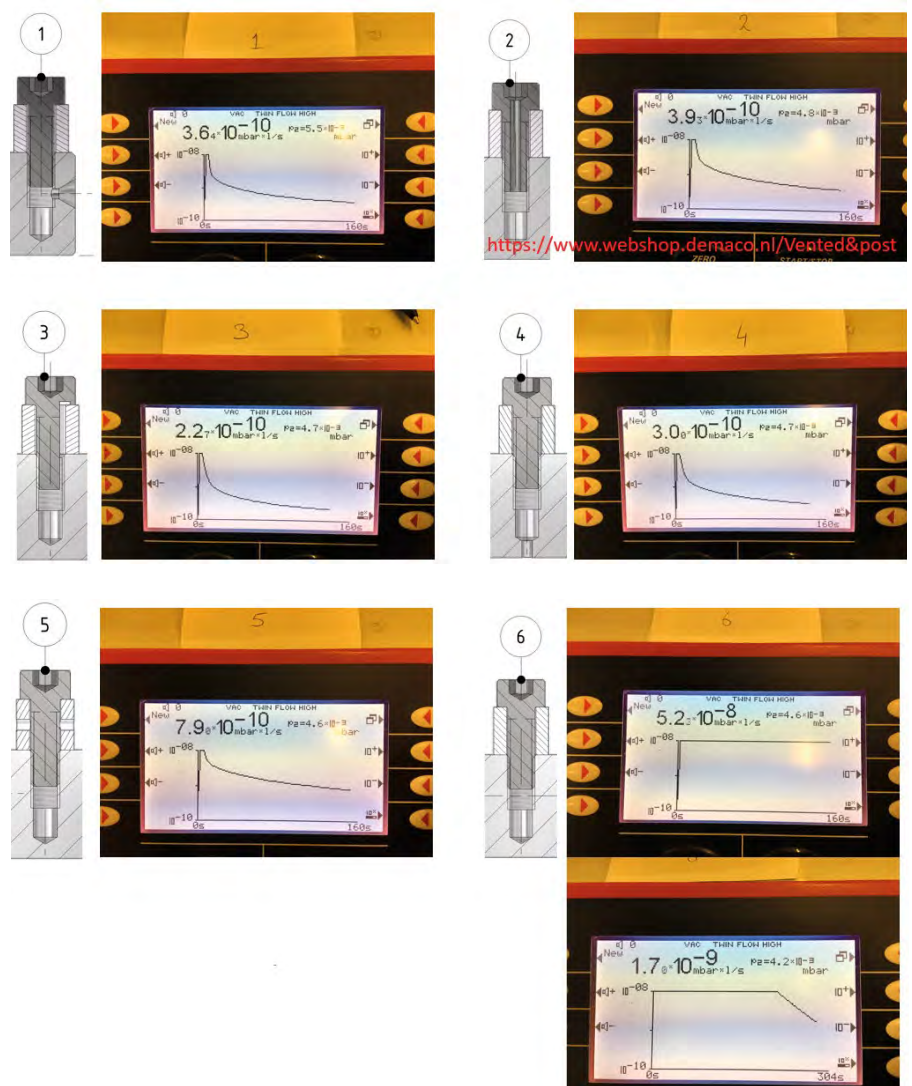
Iedere boutverbinding is individueel getest met een heliumlekttest (Figuur 4). Hierbij is helium in het tapgat geblazen, de bout ingeschoefd en de verbinding met 3 Nm vastgezet. Daarna is de plug op de heliumlekttester geplaatst en geëvacueerd voor de meting van de leksnelheid (*leakrate*). De heliumleksnelheid [mbar·l/s] is na een gegeven afpomptijd gemeten.

Resultaten

Figuur 5 toont de leksnelheidsdata voor de zes boutoplossingen. Voor een tijdsduur van 160 s is een 'foto' genomen. Bij bout 6 lag de leksnelheid twee ordes hoger, reden waarom een extra test met een tijdsduur van 304 s is uitgevoerd. De afbeeldingen zijn gedigitaliseerd en ter vergelijking in Figuur 6 over elkaar heen geplott.

Interpretatie

De meetresultaten tonen de heliumleksnelheden na een vastgestelde afpomptijd. Tussen elke meting is de kamer met een blindflens afgepompt, zodat metingen elkaar onderling niet beïnvloeden. Voorafgaand aan elke meting is helium rond/in het tapgat geblazen, waarna de verbinding is vastgezet en de meting plaatsvond.

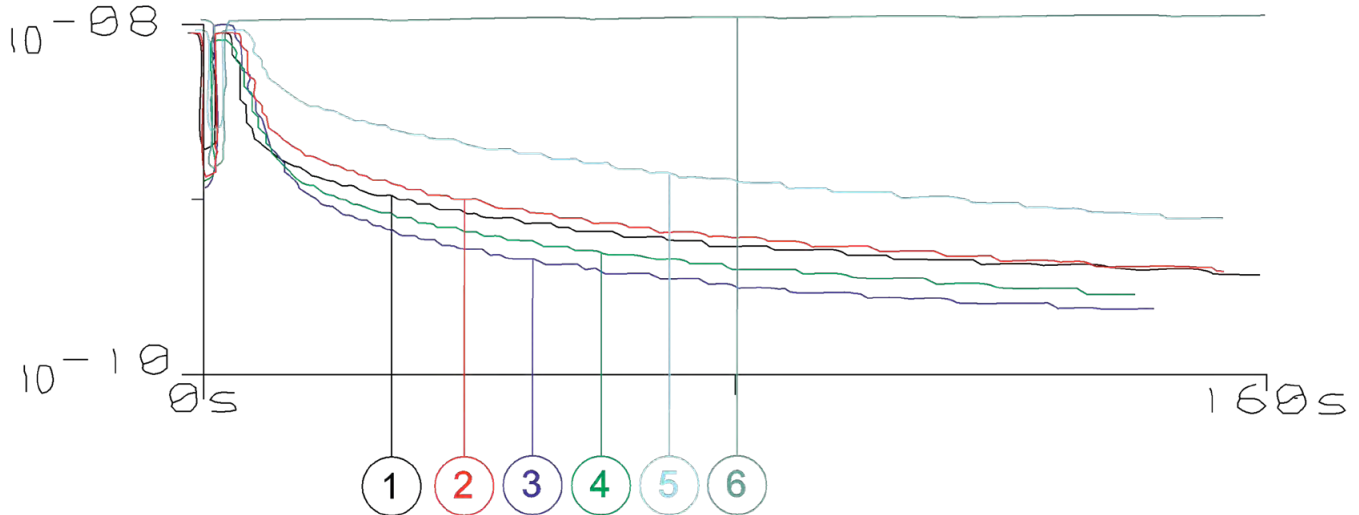


Figuur 5. Leksnelheidsdata voor de zes boutoplossingen, met twee metingen voor bout 6 (zie de tekst).

Discussie

Punt van discussie is of een hybride oplossing, zoals een speciale coating of een anti-frictiecoating, een nog betere balans kan bieden tussen vacuümeigenschappen

en mechanische sterkte. Of vergroten anti-frictiemiddelen, zoals molybdeensulfide en coatings, juist het virtuele lek bij de contactvlakken van de schroefdraad, omdat het mogelijk als 'afdichting' functioneert?



Figuur 6. Vergelijking van de leksnelheden voor de zes boutoplossingen.



Configure your
ASM 340 variant online!

Reliable and high-performance. Multipurpose leak detector ASM 340.

The leak detectors in our ASM 340 series guarantee top performance in vacuum or sniffing leak detection for various applications, from maintenance to applications in production environments. They are the perfect solution for everyday testing even in severe test conditions.



Part of the **BUSCH** GROUP

Pfeiffer Vacuum Benelux B.V.
Newtonweg 11 | 4104 BK Culemborg | The Netherlands
+31 345 478 400 | office.benelux@pfeiffer-vacuum.com
www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER
VACUUM+FAB SOLUTIONS

Agenda

20 mei 2025

Workshop Atomic Layer Deposition and Etching for Quantum Computing
Eindhoven

6 juni 2025

NEVAC-dag
Enschede

8-11 juli 2025

IVNC 2025, 38th International Vacuum Nanoelectronics Conference
Reykjavik, IJsland

24-29 augustus 2025

ECOSS-38, 38th European Conference on Surface Science
Braga, Portugal

15-19 september 2025

IVC-23, 23rd International Vacuum Congress
Sydney, Australië

21-26 september 2025

AVS 71, International Symposium and Exhibition
Charlotte, North Carolina, USA

21-24 oktober 2025

IUVSTA workshop 105
Santa Margherita Ligure, Italië

29-31 oktober 2025

COMSOL Conference 2025
Amsterdam

Links naar event-websites:

Agenda op www.nevac.nl



The IDP Dry Scroll Pump Family Is Growing!

Quiet, Oil-Free, Worry-Free Vacuum

Introducing the new IDP-35 and IDP-45: smart, user-friendly technology for your higher capacity vacuum needs. Low noise and vibration; sustainable, oil-free design; simple, infrequent maintenance; integrated vacuum isolation valve.



Learn more: www.agilent.com/chem/vacuum
00 800 234 234 00 (toll-free)
vpt-customer@agilent.com

© Agilent Technologies, Inc. 2025

VACUUBRAND®



www.vacuubrand.com



Screw pump VACUU·PURE® 10

- 10^{-3} mbar vacuum range
- 100% oil-free
- No abrasion
- No wear parts



Pieter Heidema
pieter.heidema@vacuubrand.com
M +31 6 21 17 48 14