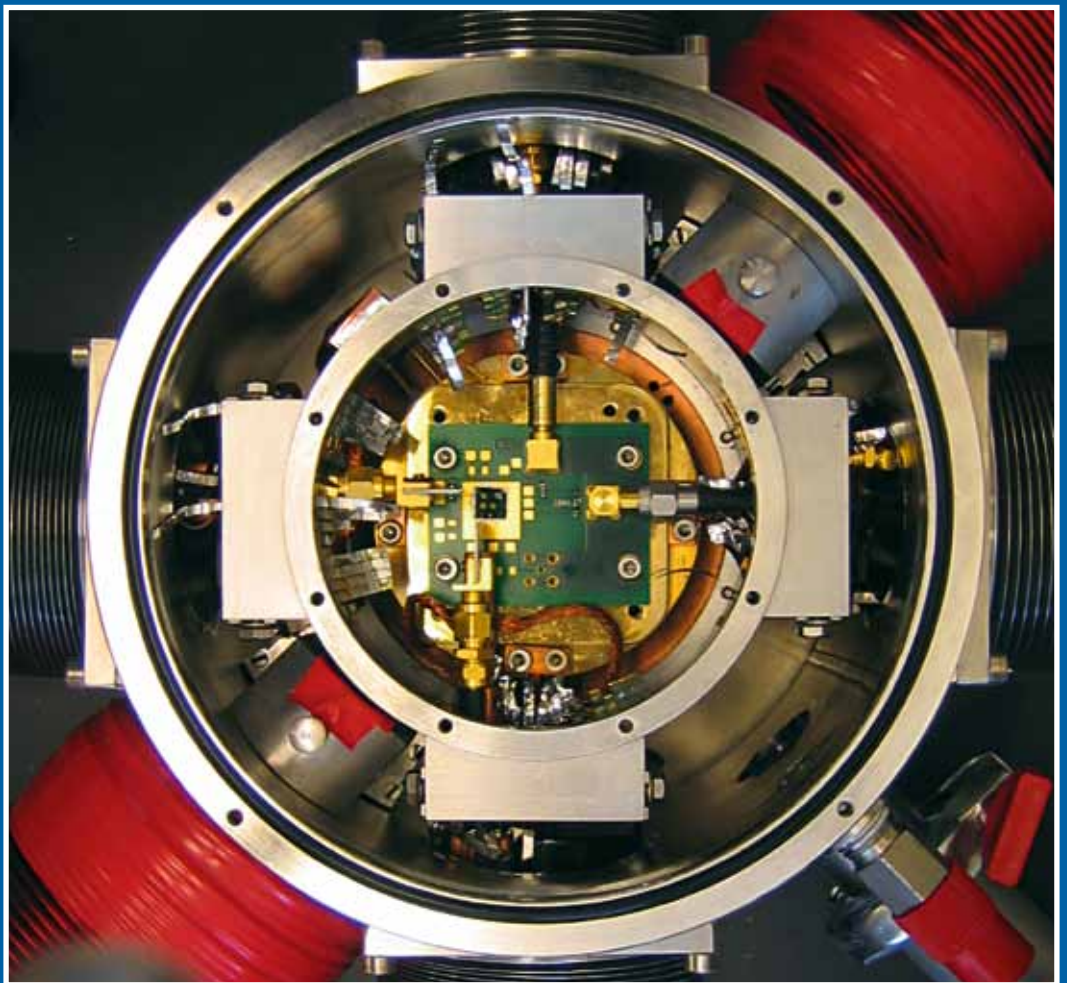


NEVAC

blad

JAARGANG 47 / UITGAVE 2

NanoElektroMechanische Systemen



Verder in de uitgave:

- Hipace Turbopump
- Mass Spectrometry

Complex Vacuum Systems Fully automatic.



© BICOM_10018_02 05.2009

The vacuum systems from Oerlikon Leybold Vacuum simply offer more. Your process will be improved by the performance of our systems!

The vacuum systems being equipped with PLC and integrated visualization offer besides optimized system monitoring and control the option of remote troubleshooting.

Typical applications are high vacuum systems, analytical and calibration systems as well as experimental coating systems for industrial and university research.

The UNIVEX 450 C is a universal, fully automatic cluster system for the production of functional coatings, respectively coating systems where the sequence of the layers can be freely selected.

Contact us – we are engineering our customer's success.

Oerlikon
Leybold Vacuum Nederland B.V.
Proostwetering 24 N
3543 AE Utrecht

T +31 30 24 26 330
F +31 30 24 26 331
sales.vacuum.ut@oerlikon.com

www.oerlikon.com/leyboldvacuum

oerlikon
leybold vacuum

Colofon

Redactie

Dr. G. Palasantzas
Dr. ir. B.J. Kooi

Web-adres

www.nevac.nl

Redactiesecretariaat

Dr. G. Palasantzas / Dr. ir. B.J. Kooi
Rijks Universiteit Groningen
Applied Physics
Zernike Institute for Advanced Materials
Nijenborgh 4
9747 AG Groningen
telefoon: 050-3634272 / 050-3634896
e-mail: g.palasantzas@rug.nl / b.j.kooi@rug.nl

Adres abonnementenadministratie

Dr. A.R.H.F. Ettema
SPECS Nanotechnology BV
Delftechpark 26
2628 XH Delft, The Netherlands
Telefoon: +31 15 2600406
Fax: +31 15 2600405
e-mail: ettema@specs-nanotechnology.nl

Abonnementen

Binnenland € 25,- per jaar
Buitenland € 35,- per jaar

Advertentie-exploitatie en druk

AriëS Grafische vormgeving / Ben Mobach
Torenberglaan 42
5628 EP Eindhoven
Telefoon 040-2422366 / 0624860322
e-mail: ben.mobach@chello.nl

Grafische vormgeving, pre-press en productie

AriëS Grafische vormgeving / Ben Mobach
Eindhoven

Verschijningstijdstippen 2009

Tweede helft februari
Eerste helft mei
Tweede helft september
Eerste helft december

Diversen

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

Vergoeding kopij

Artikelen in het Nederlands van welke aard dan ook over vacuümtechniek en haar toepassingen worden door de redactie zeer op prijs gesteld. In bepaalde gevallen kan voor artikelen zonder commerciële achtergronden een vergoeding van € 20,- per pagina tekst worden gegeven.

ISSN 0169-9431

Op de voorpagina

Het figuur toont de vacuümkamer waarin nanoelektromechanische metingen aan een nanobuis resonator uitgevoerd worden.

Meer details zijn te vinden in het eerste artikel van deze uitgave.

Verenigingsgegevens

Ereleden

G. Ikking, Artemisstraat 34, 2624 ZN Delft
Prof.dr. J. Kistemaker, Jan Steenlaan 27, flat C2, 3723 BT Bilthoven
Ir. J.H. Makkink, Wilhelminasingel 36, 2641 JD Pijnacker
Prof.dr. J. v.d.Veen, Schubertlaan 8, 1411 HZ Naarden
Dr.ir. E.P.Th.M. Suurmeijer, Elzenlaan 11, 9321 GL Peize
Dr.ir. J. Verhoeven, Kon. Julianaweg 23, 3628 BN Kockengen
L.G.J.M. Hassink, Stibbe 23, 2421 MR Nieuwkoop
Th. Mulder, Ambachtsheerelaan 60, 3481 GM Harmelen

Bestuur

Prof.dr. P.M. Koenraad, voorzitter
J.W.M. van Kessel, secretaris
Dr. P.A. Zeijlman van Emmichoven, vice-voorzitter
Dr. A.R.H.F. Ettema, penningmeester

Adres secretariaat

Jan W.M. van Kessel
Dept. of Solid State Chemistry (Kamer HG 03.616), Faculty of Sciences, Radboud Universiteit Nijmegen, Toernooiveld 1 6525 ED Nijmegen. Telefoon: 024-3653068, e-mail: j.vanKessel@science.ru.nl

Adres ledenadministratie

p/a Dr. A.R.H.F. Ettema
SPECS Nanotechnology BV, Delftechpark 26, 2628 XH Delft, The Netherlands
Telefoon: +31 15 2600406, Fax: +31 15 2600405, e-mail: ettema@specs-nanotechnology.nl

Inlichtingen over opleidingen en examens

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

Penningmeester NEVAC

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

Contributies

Contributie € 18,- per jaar
Bedrijfsleden € 136,- per jaar
Studenten/promovendi € 4,50 per jaar

Inhoud

Redactioneel	pagina 4
NanoElektroMechanische Systemen	pagina 5
HiPace turbopump garners highest red dot design award	pagina 9
Using mass spectrometry to gather some insights in the fundamentals of the reactive magnetron sputtering process of Al with O ₂	pagina 10
Agenda	pagina 14

Dit tweede nummer van 2009 bevat twee verhalen van universitaire groepen uit Delft en Gent (België).

Het eerste verhaal, geschreven door prof. Herre van der Zant en zijn medewerkers van de Technische Universiteit Delft, Kavli Instituut Nanoscience Delft, gaat over nanoelektromechanische systemen (NEMS). NEMS beloven nieuwe toepassingen in meetinstrumentatie, signaalverwerking en computers. Door hun geringe afmetingen vertonen deze systemen ultrasnelle response, terwijl de niet-lineaire eigenschappen aanleiding geven tot een rijke dynamica.

Het tweede artikel, geschreven door Wouter Leroy en medewerkers van de groep van prof. Diederik Depla, gaat over het toepassen van massa-spectrometrie tijdens reactief magnetron sputteren van aluminium met zuurstof. Reactief magnetron sputteren is een belangrijke techniek die in de industrie veel gebruikt wordt voor het aanbrengen van dunne lagen.

De sluitingsdatum van kopij voor het derde nummer van het NEVAC-blad 2009 is 25 augustus 2009.

NanoElektroMechanische Systemen

Warner Venstra, Samir Etaki, Khashayar Babaei Gavan, Menno Poot, Herre van der Zant
Kavli Instituut Nanoscience Delft, Technische Universiteit Delft, Postbus 5046, 2600 GA Delft. <http://med.tn.tudelft.nl>

NanoElektroMechanische Systemen (NEMS) beloven nieuwe toepassingen in meetinstrumentatie, signaalverwerking en computers. Door hun geringe afmetingen vertonen deze systemen ultrasnelle response, terwijl de niet-lineaire eigenschappen aanleiding geven tot een rijke dynamica. De dissipatie in NEMS is veelal lager dan die in equivalente elektrische systemen, waardoor de gevoeligheid hoog is en de warmteproductie laag. Deze ingrediënten leveren een scala aan interessante nieuwe toepassingen op. We bespreken een aantal van deze toepassingen, waarbij we met name aandacht besteden aan dissipatiemechanismen en ultragevoelige positiedetectie.

Sinds enkele decennia worden lithografische processen - ontwikkeld ten behoeve van de silicium chip industrie - gebruikt om minuscule elementen te fabriceren. Individuele structuren in geïntegreerde elektronica hebben nu afmetingen van enige tientallen nanometers. De mogelijkheid om bewegende mechanismen met deze afmetingen te ontwerpen, zogenaamde nano elektro-mechanische systemen, opent nieuwe mogelijkheden. Microelektromechanische systemen, met typische afmetingen van enkele tienden van een millimeter, worden al lang en breed toegepast als sensoren, waarbij de versnellingsensoren in airbags en bewegingsdetectoren in mobiele telefoons en spelcomputers veel aangehaalde voorbeelden zijn. Sensor werking berust vaak op de bepaling van de resonantiefrequentie, die verandert onder invloed van de te meten grootheid. Voor het bepalen van deze frequentie bevinden zich op de chip elektromechanische omzeters, waarmee de amplitude van de resonator wordt gemeten als functie van de aandrijffrequentie. Kleine verschuivingen van de resonantiepiek zijn beter te meten naarmate de piek scherper is, en daarom is voor sensortoepassingen een scherpe resonantiepiek cruciaal. Ook de selectiviteit is belangrijk: de sensor reageert alleen binnen een zeer smal frequentiegebied, en leent zich daarom tot bandfilter in communicatietoepassingen. Hoe scherper het filter, des te meer kanalen er kunnen worden gedefiniëerd in een gegeven frequentiegebied, en dus des te meer informatie er tegelijkertijd kan worden verzonden. Een ander interessant aspect van micro- en nanoelektromechanische systemen is dat deze bij relatief kleine actuaie niet-lineaire eigenschappen laten zien. Dit wil zeggen dat de karakteristiek van het systeem volledig kan veranderen als functie van de intensiteit

waarmee wordt aangedreven. Dit kan gemakkelijk leiden tot bistabiliteit: bij gegeven aandrijfparameters kan het systeem zich in twee (of meer) stabiele evenwichtssituaties bevinden. Deze eigenschappen lenen zich tot toepassingen in mechanische geheugens en andere logische circuits.

Het detecteren van de beweging wordt echter moeilijker naarmate de devices kleiner worden, en daarom wordt veel onderzoek gedaan naar elektromechanische detectiemethoden [1]. De kleinste mogelijke onzekerheid in de positie wordt bij kamertemperatuur bepaald door de gemiddelde amplitude van de positieruis, gegeven door de equipartitiewet $\frac{1}{2}k\langle u^2 \rangle = \frac{1}{2}k_B T$, waar k en u respectievelijk de veerconstante en de positie van de resonator zijn, en de thermische energie bestaat uit de Boltzmann constante k_B maal de temperatuur T . Dit betekent dat ook zonder aandrijving de resonator resoneert op de eigenfrequentie met een amplitude opgelegd door de temperatuur. Als de temperatuur naar het absolute nulpunt gaat, dan vertelt de kwantummechanica ons dat de kleinste mogelijke onzekerheid in de positie wordt bepaald door de onzekerheidsrelatie van Heisenberg [2]. De overgang van het thermische (Browniaanse) regime naar het kwantummechanische regime vindt plaats rond de temperatuur waarbij de thermische energie gelijk is aan de fonon energie van de resonator: $T_Q = hf_R/k_B$, met h de constante van Planck en f_R de resonantiefrequentie. Voor een gigahertz resonator ligt T_Q rond de 50 mK, en voor fundamenteel onderzoek is dit een interessant gebied dat experimenteel binnen bereik ligt. In het kwantumregime gedraagt de resonator zich niet meer klassiek en kan deze zich in een kwantummechanische superpositie van toestanden bevinden.

Dergelijk gedrag is reeds aangetoond in elektronische systemen, maar mechanische resonatoren hebben een aanzienlijk grotere massa en vormen daarmee de volgende stap voor de verkenning van de grens tussen klassieke- en kwantummechanica.

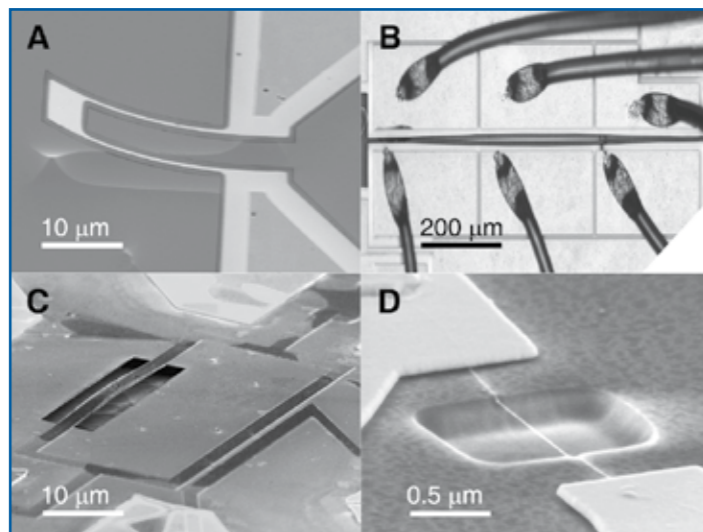
Fabricage

NEMS worden vervaardigd met lithografische technieken die worden toegepast in de elektronica industrie. Het proces begint met een substraat - vaak silicium - waarop met optische of elektronen lithografie patronen worden gedefiniëerd. Op de plek van deze patronen wordt vervolgens selectief materiaal aangebracht danwel verwijderd. Door deze stap te herhalen kunnen complexe structuren laag voor laag worden opgebouwd. De techniek wordt 'top-down' genoemd omdat het product ontstaat door het selectief wegnemen van materiaal.

In figuur 1 (volgende pagina) zijn a,b en c voorbeelden van top-down structuren. Kleinere structuren kunnen worden opgebouwd via chemische synthese. Dit wordt bottom-up fabricage genoemd, omdat het product zichzelf samenstelt uit in de omgeving aanwezige bouwstenen. Figuur 1(d) laat als voorbeeld een bottom-up gegroeide nanobuis zien, samengesteld uit koolstof atomen. De buis is slechts één atoom dik, en heeft nagenoeg geen kristalfouten - een bij top-down methoden onmogelijk resultaat. Hoewel het opbouwen van bottom-up structuren 'vanzelf' gaat, en grote hoeveelheden materiaal tegelijkertijd kunnen worden gesynthetiseerd, is het positioneren en ordenen van de individuele bottom-up structuren een lastig probleem. Voor het experimenteren met bottom-up structuren worden met lithografie (top-down dus) contacten aangebracht. Op dit moment wordt wereldwijd onderzoek gedaan naar methoden om grote aantallen bottom-up gesynthetiseerde producten op een voorspelbare manier op een substraat te plaatsen en onderling te verbinden, bijvoorbeeld door 'self-assembly' [3].

Actuatie en detectie

Om de eigenfrequentie te bepalen kan men de thermische beweging van de resonator meten. Een sterker signaal kan verkregen worden door de resonator actief aan te drijven. Optische detectiemethodes zijn in principe gevoe-



Figuur 1 (a) Peddel resonator (goud op silicium nitride) voor massadetectie. (b) Knikkende balk met twee stabiele posities. Dit systeem kan worden gebruikt als digitale informatiedrager [4] of als meetinstrument. (c) Balk-resonator die opgenomen is in een dc SQUID. Hiermee wordt de kwantum detectielimiet onderzocht [5]. (d) Nanobuis resonator (wit), gevormd door een enkele opgerolde laag koolstofatomen. Dit systeem wordt gebruikt voor hoogfrequente signaalverwerking [6].

lig genoeg om deze uitwijkingen, ter grootte van picometers, te meten zolang de afmetingen van de resonator niet veel kleiner zijn dan de golflengte van het gebruikte licht. Voor kleine, hoog frequente resonatoren werkt dit niet meer en hier bieden electromechanische detectiemethoden uitkomst. Voor aandrijving

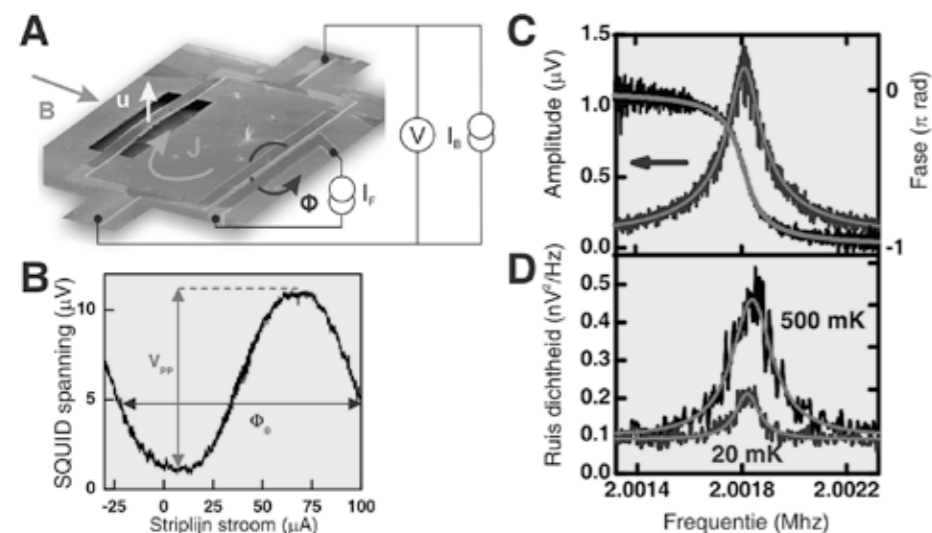
en detectie van NEMS worden over het algemeen drie verschillende methoden gebruikt: piëzo-elektrisch, capacitief en inductief. De resonator van figuur 1a wordt aangedreven door een piëzo-elektrisch kristal (geplaatst onder het substraat; niet zichtbaar op de foto) en de detectie gebeurt door meting van de pi-

ëzo-weerstand van de goudlaag. Piëzo-elektrische koppeling treedt op in kristallen waarin vervorming van het kristal een elektrische spanning tot gevolg heeft en omgekeerd. Piëzoweerstand is een gerelateerd effect, waarbij de elektrische weerstand van de resonator afhangt van zijn vervorming. De resonatoren in figuur 1b,d worden capacitief aangedreven. De resonator is elektrisch geleidend en vormt een condensator met een nabijgelegen elektrode. Hierdoor hangt de kracht op de resonator af van het spanningsverschil over de condensator (Coulombkracht) en hangt de capaciteit van de condensator af van de positie van de resonator. De resonator in figuur 1d is een koolstof nanobuisje waarvan de uitwijking wordt gedetecteerd via een combinatie van capacitieve en piëzo detectie [6]. Bij inductieve koppeling wordt op de resonator een Lorentz kracht uitgeoefend wanneer er een elektrische stroom door de resonator loopt in de aanwezigheid van een magnetisch veld. De beweging van de resonator door het magneetveld wekt vervolgens weer een spanning op waarmee de beweging kan worden gedetecteerd (inductiewet van Faraday).

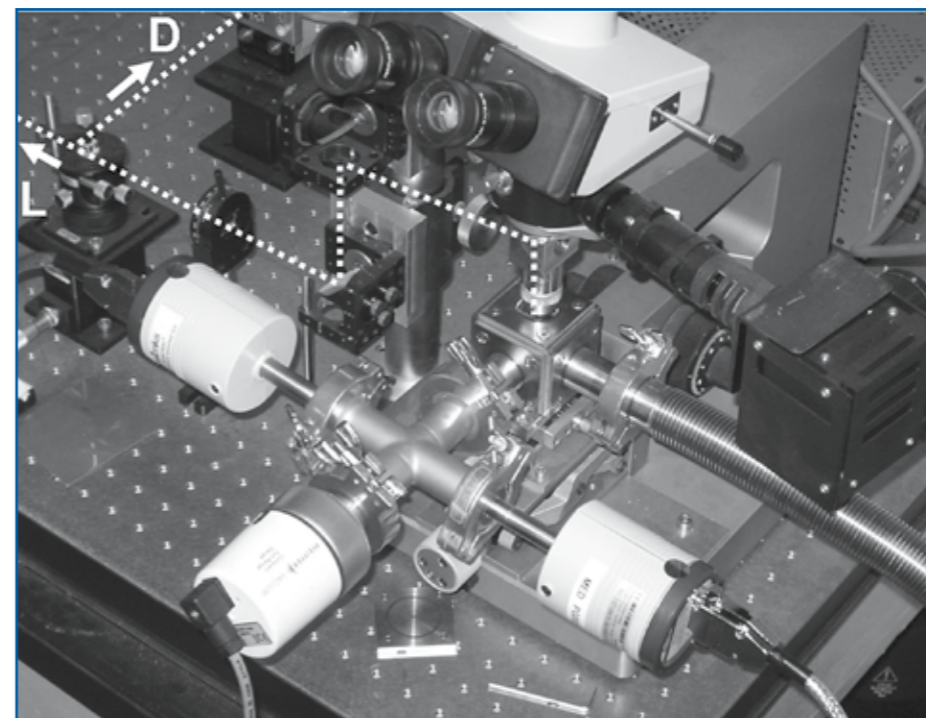
De genoemde detectiemethoden kunnen op de micro- en nanoschaal worden verbeterd door gebruik te maken van kwantum mechanische effecten. In Figuur 2 wordt een recent door onze groep verbeterde inductieve uitlezing uitgelegd [5]. Voor de piëzo- en capacitieve detectie zijn soortgelijke verbeteringen bedacht [2]. In commerciële MEMS wordt het kleinste bruikbare signaalniveau bepaald door de ruis die geïntroduceerd wordt tijdens de na-versterking van het resonatorsignaal en dit definieert dus ook het minimale actuatieniveau. Met de verbeterde detectoren wordt de positiedetectie ten opzichte van deze MEMS met vele ordegroottes verbeterd en wordt nu de intrinsieke thermische beweging van de resonator bepalend voor de ruisvloer van de NEMS. Wanneer de demping laag is en de aandrijving sterk, zal de resonator een grote uitwijking maken. Bij grote uitwijkingen is het gedrag van de resonator niet-lineair, en kan een bistabiele situatie gecreëerd worden. Dit kan vervolgens worden gebruikt om de gevoeligheid te verhogen.

Dissipatie in NEMS

De energie in een resonantiemodet van de aangedreven resonator vloeit deels weg naar andere bewegingsmogelijkheden van het systeem, waardoor uiteindelijk de temperatuur van de resonator en zijn omgeving toeneemt. De snelheid waarmee de energie wegglekt wordt gekwantificeerd met de kwaliteitsfactor (Q). Dit getal geeft de verhouding aan tus-



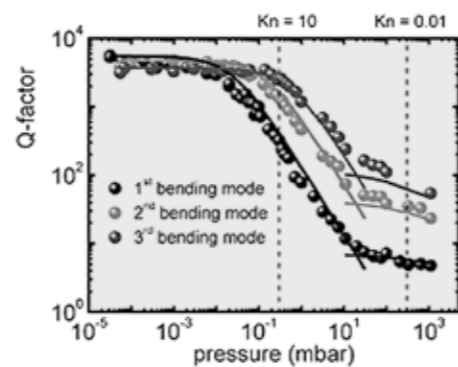
Figuur 2 (a) Een mechanische resonator geïntegreerd in een dc SQUID (een supergeleidende ring met twee kleine onderbrekingen). Het magneetveld B koppelt de positie u van de vrijhangende balkresonator aan de magnetische flux door de ring. De spanning V over de ring wordt gemeten terwijl er een stroom I_b door de ring wordt gestuurd. Vanwege flux-kwantisatie circuleert er bovendien een stroom J door de ring. Zowel V als J zijn afhankelijk van de flux door de ring. (b) V als functie van de flux ϕ door de ring die wordt ingesteld met stroom I_f door de striplijn naast de dc SQUID. V varieert periodiek met de flux met de periode van het fluxkwantum $\phi_0 = 2.05 \cdot 10^{-15} \text{ T m}^2$. (c) De frequentierespons van de resonator aangedreven met een piëzo-elektrisch kristal, gemeten via de dc SQUID spanning. (d) Het ruisspectrum van de dc SQUID spanning wanneer de resonator niet wordt aangedreven. De piek in het spectrum wordt veroorzaakt door de thermische beweging van de resonator, hetgeen calibratie van het systeem mogelijk maakt. De gevoeligheid van de detector is $4 \text{ fm}/\text{NHz}$.



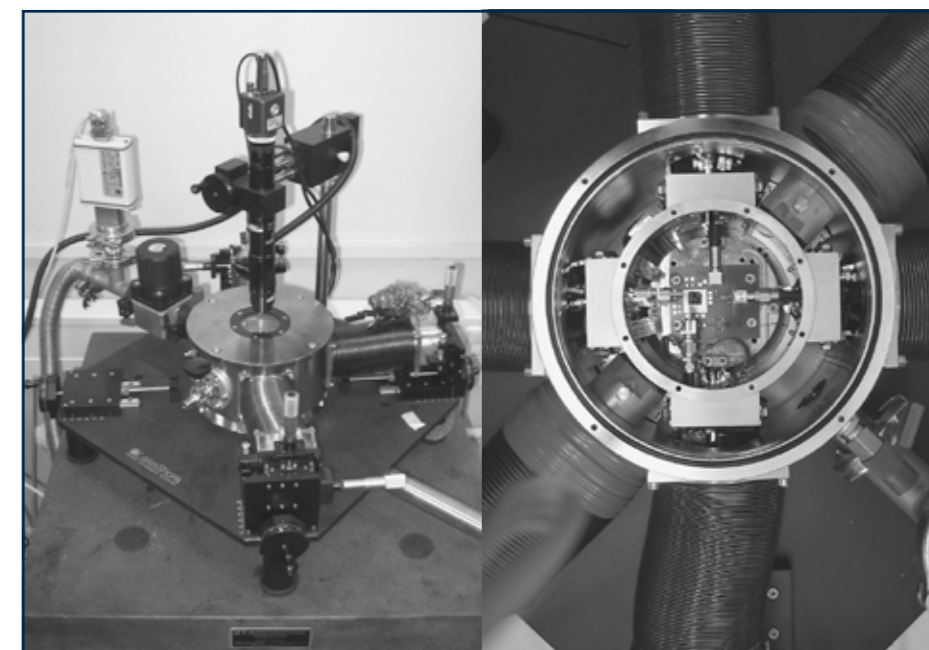
Figuur 3 Optische opstelling voor thermische ruis metingen aan micro/nanomechanische systemen. De cantilevers worden in de kubusvormige vacuüm ruimte geplaatst (midden van de foto), om de dynamische eigenschappen als functie van de druk en omgevingsgassen te onderzoeken. De bundel (gestippelde lijn) afkomstig van laser L reflecteert aan de resonator en wordt opgevangen met een foto-diode (D).

sen de opgeslagen energie in de resonator, en de snelheid waarmee de energie uit die mode wegglekt. Een hoge Q factor betekent weinig demping en een smalle resonantiepiek. Afhankelijk van resonatorgeometrie en het omringende medium zijn verschillende mechanismen maatgevend voor de demping van de resonator.

Deze mechanismen hebben wij onderzocht met behulp van een optische meetopstelling, waarmee thermische bewegingen van een cantilever (voor te stellen als een trillende duikplank op microschaal) worden gemeten als functie van de omgevingsdruk [7]. Figuur



Figuur 4. Afhankelijk van de omgevingsdruk zijn verschillende dempingsmechanismen dominant. Deze metingen zijn gedaan met een enkelzijdig ingeklemde balkresonator (cantilever).



Figuur 5 (a) Probestation gebruikt voor nanobuis metingen. (b) Gemonteerd device op meetprint in vacuüm kamer. De nanobuis resonator bevindt zich op een silicium substraat (het kleine zwarte vierkantje in het midden van de kamer). Elektrisch contact wordt gemaakt via doorvoeren en verplaatsbare naalden (probes).

Afhankelijk van de druk zijn drie regimes te onderscheiden. In vacuüm is de demping intrinsiek en wordt bepaald door fonon verstrooiing, thermoelastische effecten, en interacties aan de oppervlakte van de resonator. Onzuiverheden zoals scheurtjes, oppervlakte ruwheid, en dislocaties spelen mogelijk een belangrijke rol in dit regime. Ook bij de klem-punten verliest de resonator energie: een deel van de energie vloeit weg naar het substraat. Bij hogere druk worden de botsingen tussen de resonator en omringende moleculen belangrijk. Dit wordt het moleculaire gebied genoemd, en in dit regime is de kwaliteits-factor omgekeerd evenredig met de druk. Wordt de druk nog hoger dan kan men de gasmoleculen niet meer als onafhankelijk beschouwen. Het gas is nu visceus en incompressibel, en in de praktijk is dit meestal het regime waarin gewerkt wordt. Bij benadering is de Q-factor in dit gebied onafhankelijk van de omgevingsdruk.

Figuur 4 toont de Q-factor van de eerste drie buigresonanties als functie van de druk voor een top-down gefabriceerde silicium nitride cantilever [7] met afmetingen $80\mu\text{m} \times 17\mu\text{m} \times 200\text{nm}$, en met resonatiefrequenties in de orde van enkele honderden kHz. In de figuur is ook het Knudsen nummer aangegeven, dat de verhouding aangeeft tussen de karakteristieke afmeting van het systeem (de breedte van de cantilever, w) en de vrije weglengte van de omringende moleculen, λ : $\text{Kn} = \frac{w}{\lambda}$. De drie regimes zijn duidelijk te onderschei-

den: in het intrinsieke regime is de Q-factor min of meer constant en gelijk aan 5000. Bij ongeveer 0.1 mbar begint voor deze cantilever het moleculaire regime, en neemt de Q factor lineair af met de druk. Vanaf ongeveer 10 mbar is het medium visceus, en is de Q factor weer ongeveer constant.

Wanneer de resonator verder verkleind wordt zal deze zich bij steeds hogere drukken in het intrinsieke regime bevinden: de vrije weglengte is ook bij atmosferische druk veel groter dan de resonator afmeting. Dit betekent dat het intrinsieke gebied met de hoge Q waardes al bereikt wordt bij atmosferische druk, hetgeen veelbelovend is voor toekomstige sensor applicaties.

Nanotube resonatoren

Naast de ontwikkeling van nieuwe methoden voor positiedetectie wordt ook onderzoek gedaan naar de eigenschappen van het materiaal waaruit de resonator is opgebouwd. Hoogfrequente resonatoren kunnen worden verkregen door materialen met hoge elasticiteitsmodulus en een lage massa-dichtheid te gebruiken. De aanwezigheid van mechanische spanning in het materiaal heeft een grote invloed op de resonantiefrequentie en de Q factor. Het intrinsieke verlies blijkt vooral plaats te vinden aan het oppervlak van de resonator en is belangrijk voor NEMS omdat die veel oppervlak hebben in verhouding tot hun volume. Hier komt het voordeel van 'bottom-up'

fabricage naar voren: een paar lagen grafeen [8] of koolstof nanobuisjes (figuur 1d) hebben in principe een roosterfout-vrije structuur en de voorspelling is dat dit leidt tot een zeer lage dissipatie. Tot nu toe werden metingen aan nanobuis resonatoren voornamelijk bij kamertemperatuur gedaan, bijvoorbeeld met de vacuumpstelling van figuur 5. Vanwege de halfgeleidende eigenschappen van de buisjes kunnen de kleine, hoogfrequente trillingen gemeten worden door de nanobuis als frequentiemixer te gebruiken [6]. De gevonden Q-factoren (typisch 300) zijn echter veel lager dan men zou verwachten voor een defect-vrij systeem. Onlangs lieten wij zien dat met nanobuisjes wel degelijk hoogfrequente resonatoren (300 MHz) met Q-factoren van meer dan 105 (figuur 6) gemaakt kunnen worden [9], zij het bij lage temperaturen. Ter vergelijking: de beste top-down NEMS hebben bij dezelfde frequentie en temperatuur een Q van een paar duizend.

De lange dunne nanobuisjes hebben een bijzonder lage veerstijfheid. Dit betekent dat de resonator zeer gevoelig is voor kleine verstoringen, en dit maakt hem geschikt voor toepassing als uiterst gevoelige krachtensor. Bovendien kan de eigenfrequentie van de resonator, die zich als een snaar gedraagt, elektronisch over een groot gebied worden verstoord door de trekkracht in de buis aan te passen (figuur 6c). Op deze manier kunnen verstelbare hoogfrequente NEMS filters wor-

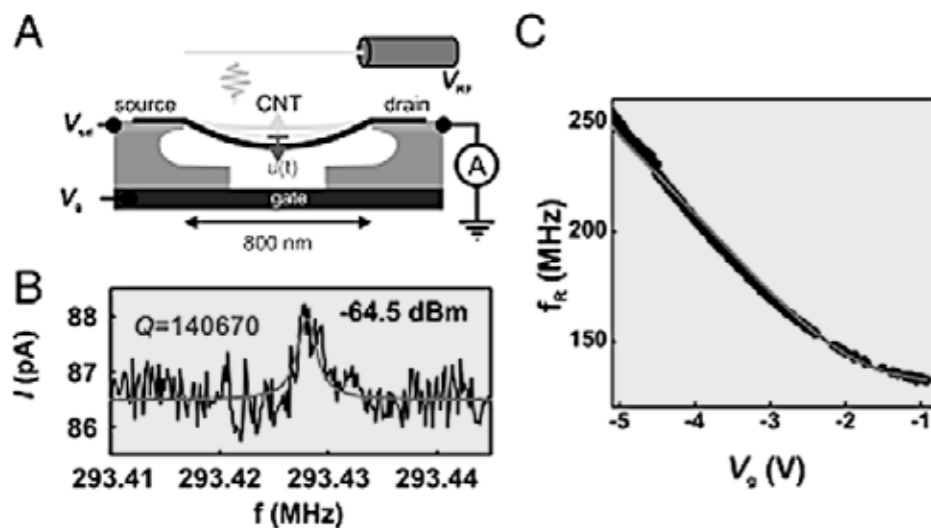
den geïmplementeerd.

Volop in beweging

Er is een wereldwijde race gaande om het potentieel van NEMS te realiseren. Zo zijn de NEMS uit [9] in principe gevoelig voor massadetectie met atomaire resolutie. Dit maakt on-chip massaspectroscopie mogelijk met een grotere gevoeligheid dan huidige technieken: een enkel helium atoom zou gedetecteerd kunnen worden. Met NEMS wordt ook gewerkt aan mechanische geheugenelementen met zeer hoge dichtheden. Ook proberen verschillende groepen als eerste de kwantumlimiet voor NEMS te bereiken: detectie van de mechanische ruis van een gigahertz resonator bij temperaturen beneden de 50 mK. Deze mijlpaal opent vervolgens weer de weg naar het gebruik van het kwantummechanische gedrag van deze resonatoren in elektromechanische circuits voor bijvoorbeeld kwantumberekeningen [2]. De basis voor deze ontwikkelingen wordt op dit moment gelegd.

Referenties

- 1 H.G. Craighead, *Science* 290 (2000), 1532
- 2 K.C. Schwab et al., *Physics Today* 58 (2005), 36
- 3 M. Li et al., *Nature Nanotechnology* 3 (2008), 88
- 4 W.J. Venstra et al., *Applied Physics Letters* 94 (2009)
- 5 S. Etaki et al., *Nature Physics* 4 (2008), 785
- 6 B. Witkamp et al., *Nano Letters* 6 (2006), 2904
- 7 K. Babaei Gavan et al., *Proc. IEEE NEMS* (2009)
- 8 M. Poot et al., *Applied Physics Letters* 92 (2008), 063111
- 9 A.K. Hüttel et al., *Nano Letters*, ingestuurd

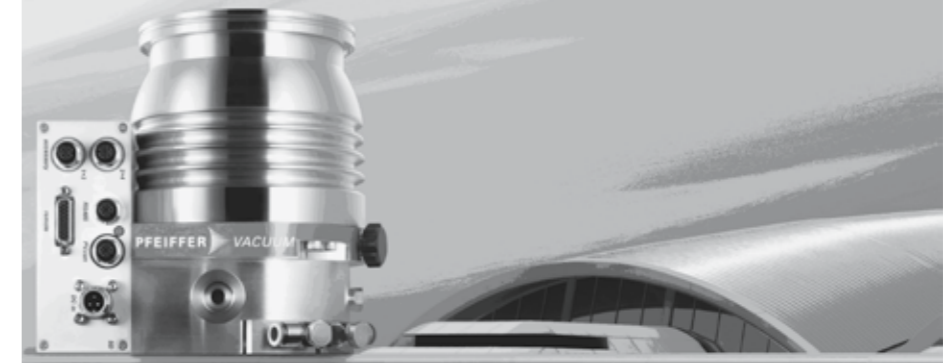


Figuur 6 (a): De nanobuis wordt aangedreven door een radiofrequent signaal uitgezonden door een nabij geplaatste antenne. De positie wordt gedetecteerd door een spanning VSD over het buisje te zetten en de stroom door de buis te meten als functie van de aandrijffrequentie f . (b) De frequentierespons van het buisje in vacuum bij een temperatuur van 20 mK vertoont een Q van meer dan 105. (c) Resonantiefrequentie f_R als functie van de gate voltage V_g . Met dit voltage wordt mechanische spanning aangebracht in het buisje, waardoor f_R varieert. Dankzij de grote flexibiliteit van het buisje kan de resonantiefrequentie van de buis over een groot bereik worden gestemd.

Dit werk wordt financieel ondersteund door FOM, NWO en NanoNed. Wij danken Mascha van Oossanen voor haar hulp bij het ontwerpen en het bouwen van de meetopstellingen en Emile van der Drift voor zijn expertise bij de fabricage van de top-down devices.

Press releas - Design award for Pfeiffer Vacuum

HiPace turbopump garners highest red dot design award



With their innovative design and the utmost in technological perfection, Pfeiffer Vacuum has been setting clear accents in the vacuum technology market for years with its products. This commitment has enabled the company to win the prestigious red dot design award. The design of the HiPace 300 turbopump from Pfeiffer Vacuum was the convincing factor in this international design competition. Within the framework of the red dot award: product design 2009, the jury honored only 49 of the 3,231 submitted products with the "red dot: best of the best" award for the utmost in design quality. The jury found that the HiPace numbered among these 49 forward-looking design products.

The assessment criteria included level of innovation, functionality, ergonomics, service life, ecological compatibility and self-explanatory quality. The red dot design award, whose origins date back to 1955, is today the world's largest and most prestigious design competition.

The HiPace pumps are characterized by their high cost-effectiveness and their flexibility in all installation orientations. The improved rotor design affords both high pumping speeds and

high gas throughputs. The functional aluminum housings make these pumps extremely light in weight. The integrated drive electronics in the HiPace pumps reduce the need for cumbersome and costly cabling. And the use of innovative materials has doubled the service life of the drives. All connections, such as backing vacuum, sealing gas, water cooling or electrical lines, are in close proximity to one another, making them easily accessible. The reduction in the use of raw materials and optimization of energy consumption are setting standards in ecological compatibility. In addition to analytical, vacuum-process and semiconductor technology, their broad range of applications also includes

coating, research & development, as well as industrial applications.

Pfeiffer Vacuum had already won the prestigious "R&D 100 Award" in 2008 for the development of its HiPace turbopumps. Moreover, the HiPace turbopumps were also honored as being products that possess innovative character at the MSV International Engineering Fair in Bryno. Pfeiffer Vacuum is convinced that this outstanding combination of design and technology is a key prerequisite for success in the marketplace

Profile Pfeiffer Vacuum

Pfeiffer Vacuum is one of the world's leading manufacturers of components and complete systems for generating, measuring and analyzing vacuum. Ever since the turbomolecular pump was invented by Pfeiffer Vacuum, the company has been synonymous with innovative solutions and high-technology products that are used in analytical applications, research and development, environmental technology, chemistry, semiconductor production, coating technology as well as in the automotive industry and any number of further sectors. Established in 1890, Pfeiffer Vacuum is active worldwide today with a workforce of some 700 people as well 10 subsidiaries and over 20 agencies. Headquartered and manufacturing in Asslar, Germany, this medium-size enterprise generates annual sales revenues of around € 200 million and is listed in the TecDAX at the Frankfurt Stock Exchange.

Press contact

Pfeiffer Vacuum GmbH
Public Relations, Sabine Trylat
Tel. +49 (0) 6441 802 169
Fax +49 (0) 6441 802 500
E-Mail Sabine.Trylat@pfeiffer-vacuum.de
www.pfeiffer-vacuum.net

Press releas - HiPace™ Plus Turbopump

Ideal for analytical applications!

Very low vibration spectrum

In addition to the current new product line of HiPace 10-700 l/s turbopumps, Pfeiffer Vacuum has brought to market new compact yet powerful turbopumps under the name, HiPace 300 Plus. This pace-setter is available with pumping speed up to 260 liters per second. The pump is characterized by its reduced and improved vibration spectrum which makes it ideal for analytical applications such as electron microscopy and high-end mass spectrometry. Furthermore, the pump of-

fers high cost-effectiveness due to extended service intervals. The improved rotor design gives both, high pumping speeds and high gas throughputs, coupled with very good compression for light gases.

New drive electronics, reduced run-up time

The integrated HiPace drive electronics reduce the need for cumbersome and costly cabling. The use of innovative materials has doubled the service life of the drives. And run-up time has also been reduced, so that the instrument is faster available. Remote and sensor functionalities allow analysis of pump data, such as temperatures. The functional aluminum housings make these pumps extremely light in weight. A sealing gas connection safeguards the bearings against particulate matter or oxidizing gases. This translates high reliability in both light duty and harsh duty applications. And their quiet operation and improved gas loads are setting new standards.



Using mass spectrometry to gather some insights in the fundamentals of the reactive magnetron sputtering process of Al with O₂

Wouter P. Leroy^{1*}, Stijn Mahieu¹, Rosita Persoons², Diederik Depla¹

¹ Ghent University, Department of Solid State Sciences, Krijgslaan 281/S1, B-9000 Gent, Belgium; t. +32 9 2644382; f. +32 9 2644996; ² Flemish Institute for Technological Research (VITO), Boeretang 200, B-2400 Mol, Belgium. *Wouter.Leroy@UGent.be

Keywords: mass spectrometry, sticking coefficient, sputtering, oxides

Abstract

Models describing the reactive sputtering process need experimental input for some important parameters as the knock-on yield, the reaction rate constant, the sticking coefficient on the target, and the sticking coefficient on the deposited target material.

Here, a method is summarized to calculate the sticking coefficient of O₂ on the deposited material, during the reactive magnetron sputtering [1]. Mass spectrometry is used to measure local, effective O₂ partial pressures during sputtering, at the position of the sample. Combined with electron probe microscopy analysis of the oxygen content in deposited layers, we calculate the sticking coefficient. At our conditions, a local, effective pressure of $(5.26 \pm 0.44) \times 10^{-6}$ mbar was found and an average sticking coefficient of 0.107 ± 0.032 for O₂ on deposited aluminium during reactive magnetron sputtering.

Reactive magnetron sputtering is a very important PVD process in thin film deposition, particularly for producing complex compound films such as oxides, nitrides and carbides.^[2] Reactive magnetron sputtering may exhibit a typical 'hysteresis' effect with the reactive gas flow. The first trial to model this phenomenon was originally proposed by Berg et al.,^[3,4] and his basic model does a good job in describing the reactive sputtering process in a first order. However, a more complete target oxidation model is developed which takes chemisorption, ion implantation and knock-on effects into account.^[5-7] From all models it can be deduced that the hysteresis is correlated to a change in the reactive gas balance which is a result from the gas consumption at the target, the chamber walls and the substrate. Therefore, in a step towards a more complete model for reactive magnetron sputtering, one needs experimental input on all influencing parameters (even if they are difficult to retrieve from experiments) like the knock-on yield, the reaction rate constant, the sticking coefficient on the target, and the sticking coefficient on the deposited material.^[8] Snyders et al. combined mass spectrometry and theoretic modelling to study the plasma-surface interactions for the reactive sputtering deposition of SnOx films and used sticking coefficients as fitting parameters.^[9] Mao et al. used mass spectrometry to calculate an upper bound for the sticking coefficient of N atoms on TiNx surfaces.^[10] Kusano et al. stresses the importance of gettering effects

(i.e. adsorption of reactive gas by the chamber walls and the substrate) in the Ti-O₂ reactive sputtering process, and estimated the sticking coefficient of O₂ on Ti.^[11] However, these papers do not give a decent calculation of the sticking coefficient.

In this work, mass spectrometry is used to deliver more insights on one of the missing links, i.e. the sticking coefficient of O₂ on the metallic coating during sputtering. This parameter has a great influence on the reactive sputtering behaviour and on the final properties of the deposited thin oxide film. This article describes a method to calculate the sticking coefficient of O₂ on the deposited material, during the reactive magnetron sputtering of aluminium. In future more metal-

oxygen systems will be examined with this method to get a better insight on the behaviour of this parameter.

2. Experimental

The sputter deposition set-up used for the experiments consists of a stainless steel chamber which was evacuated down to a base pressure lower than 2×10^{-6} mbar. The argon and the oxygen gas flow were controlled with mass flow controllers. The gas pressure during sputtering and calibration measurements was measured with a capacitance gauge, while the residual gas pressure was measured with a Penning gauge. Pumping speed was kept constant during all experiments and was set in the beginning of the experiments by introducing 20 sccm (standard cubic centimetre

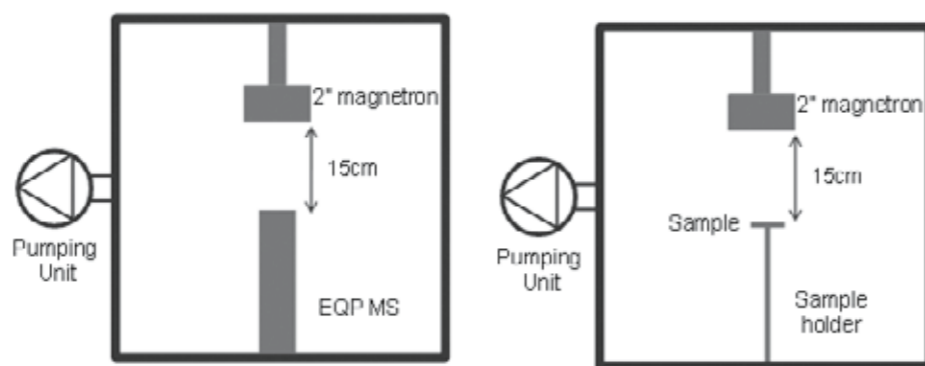


Figure 1: Sketch of the experimental setup. Left: the setup for the MS measurements. Right: the setup for the depositions. The distance between the orifice of the MS and the target surface, and between the sample surface and the target surface is the same!

per minute) Ar and reducing the pumping speed in order to obtain a pressure of ca. 3.4×10^{-3} mbar, resulting in a pumping speed of ca. 100 l/s. Depositions with intended oxygen are done with an extra flow of 1.5 sccm O₂. Two-inch diameter Al targets with a purity of 99.99% (Kurt J. Lesker) were used in a conventional DC magnetron and powered by a DC generator. During the experiments, the current was kept constant at 0.47 A. The substrates were pieces of RCA-cleaned Si (with native oxide layer) having dimensions of 8 x 8 mm². The samples are placed at 15cm from the target surface. The thickness of the layers was measured using a Taylor-Hobson Talystep. Deposition time was 45 minutes to get layers of 1 μm thickness.

The stoichiometry of the layers was measured with electron probe microanalysis (EPMA) from JEOL (JXA-8621MX, 30nA beam current, 15 keV voltage), by averaging over 9 points distributed over the sample surface. The plasma characterisation was done with an energy-resolved mass spectrometer (MS) (Hiden Analytical, EQP1000), optimized for residual gas analysis (RGA) and with the orifice placed at the same position as the samples during deposition, i.e. at a distance of 15cm from the target surface. Figure 1 shows a sketch of this experimental setup.

3. Results and Discussion

The sticking coefficient α is defined as the ratio between the amount of particles incorporated in the layer, to the total amount of incoming particles during the deposition process.

3.1. Incoming particles

The incoming particle flux of O particles on the substrate is calculated by

$$\Phi_{O_{2\text{ gas}}} = 2 \times \frac{p_{\text{eff}}}{\sqrt{2\pi \times k_B \times T \times m}} \quad (5)$$

with k_B the Boltzmann constant, T the temperature, m the mass of the gas molecule, and p_{eff} the effective partial pressure of the reactive gas (O₂). The latter is defined as the actual, local partial pressure of O₂ during sputtering at the position of the sample. This local pressure is not the same as measured with the capacitance gauge positioned on the side of the chamber, because locally (i.e. at the position of the sample) more O₂ is consumed by the sputtered metal particles. Therefore, it is necessary to calculate 'the local effective pressure' during sputtering at the position of the sample. Therefore, a calibration line rela-

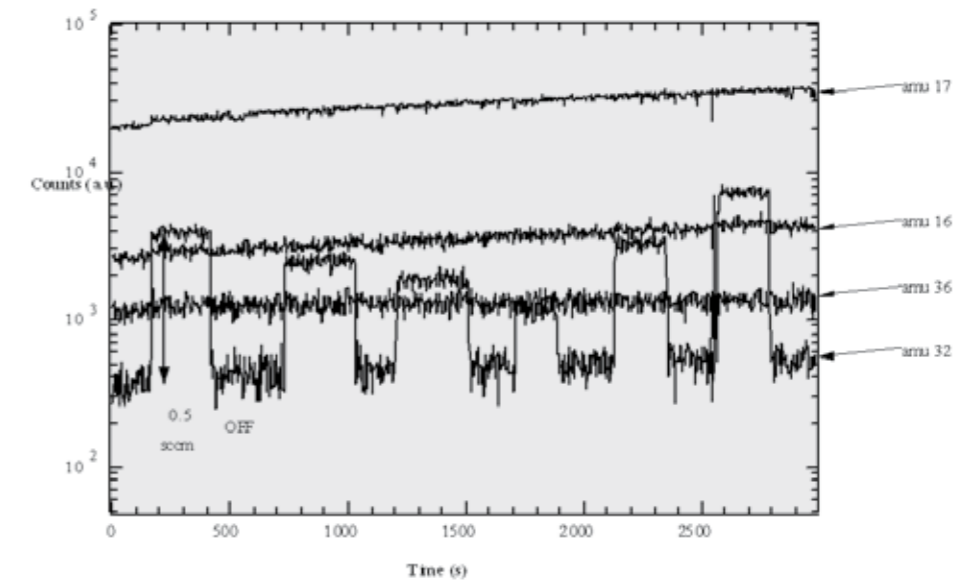


Figure 2: Mass Spectrometer O₂ Calibration Measurement. The signals for O, OH, O₂ and Ar (resp. amu= 16, 17, 32 and 36) are shown. The change in O₂ flow is marked at the bottom of the graph. The net amount of O₂ counts is measured together with the change in O₂ partial pressure. All MS measurements are background corrected and normalized to the Ar (amu 36) signal.

ting the amount of counts for amu 32 (=O₂) measured with the MS and oxygen pressure has to be set up for the system under consideration.

As shown in figure 2, the net amount of O₂ counts (amu = 32) is measured at different gas flows (i.e. different partial pressures) covering a wide range of partial pressures, without sputtering. These pressures were recorded using a capacitance gauge, which yield correct

pressure values for the entire system, when not sputtering. To allow comparison between different MS measurements, the O₂ counts are first corrected for an increase in background pressure within the MS, using the OH, H₂O and CO₂ signals (resp. amu=17, 18 and 44). Afterwards all O₂ counts are normalized to the amu 36 (=Ar) signal, which should be constant during all measurements. Figure 3 shows a calibration line at the standard experimental conditions, where the normalized,

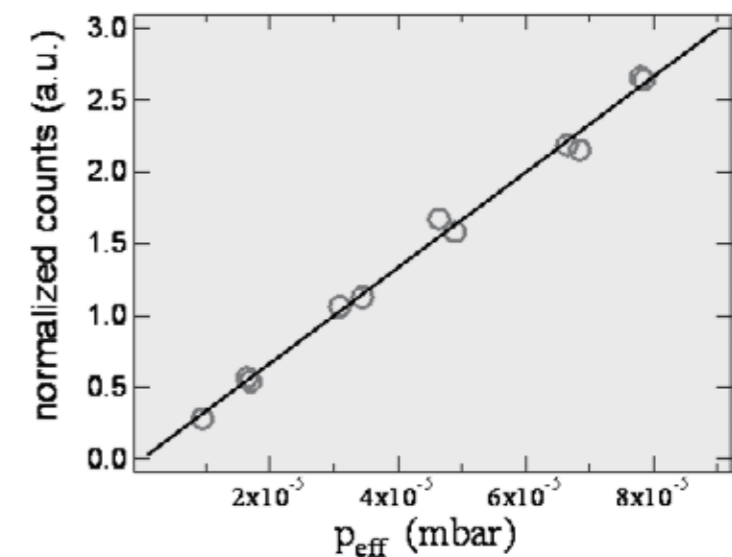


Figure 3: Calibration line for the Al-O system. The amu 32 signal (mostly O₂⁺) of the mass spectrometer is plotted versus the partial pressure of the added O₂ gas. The MS signal is first corrected for background gasses and then normalized to the (constant) amu 36 (Ar⁺) signal to allow comparison between several measurements. This calibration line is used to calculate the effective partial pressure of the O₂ gas during sputtering.

**Totaal leverancier
in de vacuümtechniek!**



Engineering



- 3d CAD modellering van specials/systemen
- Concept tot volledige realisatie
- Uitwerken van klantspecifieke ideeën

Manufacturing



- Fijnmechanische werkplaats
- Vacuümdicht lassen/solderen
- Ultrasoonreinigen/uitstoken
- Cleanroom assembleren/verpakken

Service & Support



- Onderhoud en reparatie aan Vacuümsystemen / componenten
- Lekdetectie service
- Pomprevisie
- Kalibratie drukopnemers (DIN)
- Praktische trainingen

**‘Finding
and realizing
your vacuum
solutions’**

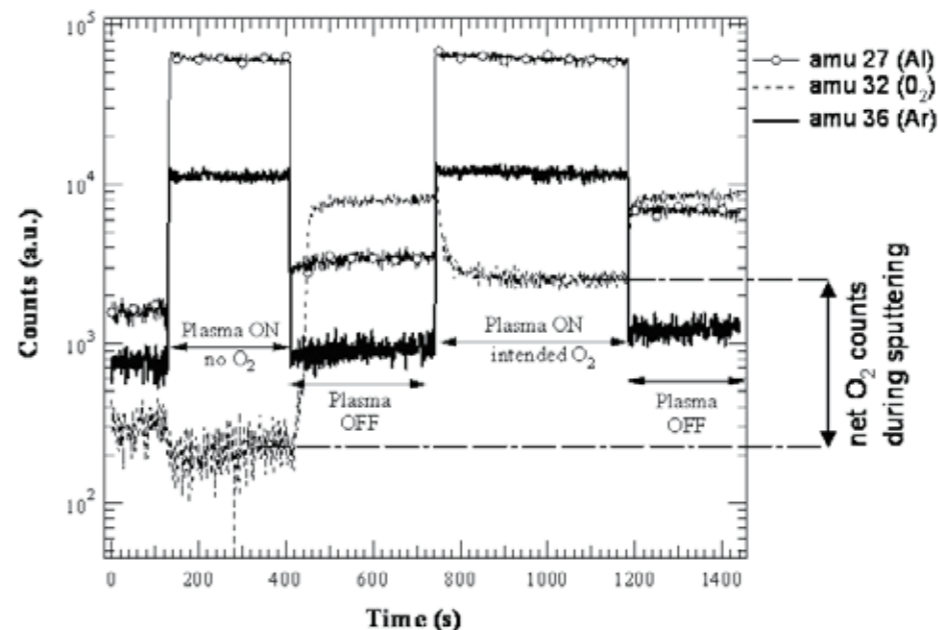


Figure 4: Mass Spectrometer Plasma measurement. The signals for Al, O₂ and Ar (resp. amu = 27, 32 and 36) are shown. The arrows show the region where the plasma is switched on. The values for the O₂ counts during plasma (without and with intended O₂ flow), are taken after the stabilising period, namely where the O₂ signal becomes relatively constant.

net amount of O₂ counts is plotted in function of the partial pressure. μ

To determine the local, effective pressure during sputtering, we take the difference of the MS amu 32 signal during sputtering with intended oxygen flow (1.5 sccm) and the MS amu 32 signal during sputtering without intended oxygen flow (0 sccm). This is done to exclude the influence of background gases still present in the chamber when doing the experiments. As can be seen in figure 4, there is a certain time for the sputtering system to get into a stable regime. The values for the counts which are used in the calculations are taken from the stabilised region. The time needed for the system to stabilise, corresponds to the presputtering period when doing the depositions. Furthermore, during sputtering one has an extra ionisation source besides the filament used in the MS to ionise the neutral gas particles for detection, namely the plasma. This causes an increase in ion intensity (RGA mode measures both neutrals and positive ions) in comparison to the measurements for the calibration line. Therefore after background correction, the O₂ signal is normalized to the Ar signal.

The net O₂ signal during sputtering is then converted into the effective pressure using the calibration line, allowing one to calculate the incoming particle flux $\Phi_{Ox, gas}$ by using equation (5). For our system and standard experiments (as described in the experimental part),

we find an average local pressure of $(5.263 \pm 0.441) \times 10^{-6}$ mbar and a corresponding flux $\Phi_{Ox, gas}$ of $(2.831 \pm 0.237) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.2. Particles in the layer

The amount of reactive gas particles in the deposited layers is determined by measuring the atomic concentrations of oxygen (at%O) with EPMA. Using this concentration and some physical properties of the metals and oxides [12], we calculate for each layer a weighted average density (ρ_{av}):

$$\rho_{av} = \frac{\left(\frac{1}{w}\right) \times at\%O \times \rho_{ox} + \left[1 - \left(\frac{w+y}{w}\right) \times at\%O\right] \times \rho_{me}}{1 - \left(\frac{w+1}{w}\right) \times at\%O} \quad (1)$$

and analogous a weighted average molecular mass (MM_{av}), with ρ_{ox} and ρ_{me} the density of the oxide and the metal, respectively. y and w are determined from the oxide composition M_yO_w (e.g. Al₂O₃, $y=2$, $w=3$).

This weighted molecular mass and density are used to calculate the particle flux (metal and oxygen) in the layer by:

$$\Phi_{int} = \frac{\rho_{av} \times R_{dep} \times N_A}{MM_{av}} \quad (2)$$

where N_A is the number of Avogadro and R_{dep} is the deposition speed as determined

from the layer thickness and the deposition time. With equation (2) and the EPMA results, the incorporated flux of oxygen particles, $\Phi_{Ox, layer}$ is calculated by:

$$\Phi_{Ox, layer} = \frac{\rho_{av} \left(\frac{w}{w+1}\right)}{1 - \left(\frac{w+1}{w}\right)} \quad (3)$$

For our Al-O system, 8 different layers with intended oxygen flow were analyzed. To account for the influence of the background pressure, 5 different layers were deposited without the intended oxygen flow. These were analyzed the same way as the samples with intended oxygen flow. For the background samples, we calculate an averaged apparent oxygen flux $\Phi_{Ox, background}$, which accounts for the contributions of the background gases (H₂O, CO₂, ...) to the oxygen content in the layer. Via this last step this yields the actual intended Φ_{Ox} :

$$\Phi_{Ox} = \Phi_{Ox, layer} - \Phi_{Ox, background} \quad (4)$$

3.3. Sticking coefficient

The sticking coefficient α of O₂ on the substrate during reactive magnetron sputtering of Al is then given by the ratio of $\Phi_{Ox} / \Phi_{Ox, gas}$ (equation (4) and (5)). The oxygen flow was kept low in order to stay within the metallic target mode. [5] Furthermore, this ensures that oxygen content in the layers is low (At%O < 0.2) and that we are still calculating the sticking coefficient on the metal and not on the oxide compound. Eight different depositions were analysed and by averaging over the 8 samples we get a value for the sticking coefficient of O₂ on Al during sputtering, $\alpha = 0.107 \pm 0.032$.

Values for the initial sticking coefficient of O₂ on an Al(111) ($\alpha = 0.005^{[13]}$, $0.01^{[14]}$, $0.02^{[15]}$, $0.03^{[16]}$), Al(100) ($\alpha = 0.015^{[16]}$) and polycrystalline Al ($\alpha = 0.03^{[17]}$) surface have been published. These values are lower than the value we obtained in this work. However, Passeggi et al. showed that the sticking coefficient of the reactive gas during deposition is generally larger than for chemisorption of the reactive gas on an already formed metal layer. [18] The reason for this difference lays in the fact that the chemisorption process during deposition is better described as co-deposition of the reactive gas molecules and the target material. This trend of a higher sticking coefficient of O₂ on Al during deposition was previously noticed by computer modelling of deposition process. [8] Using the method described [1] other metal-

Agenda

10-11 August, 2009

CASIMIR 2009 & NC-AFM,
Yale University, USA

Voor meer informatie zie: <http://www.eng.yale.edu/ncafm2009/casimir.html>

30 Augustus - 4 September 2009

European Conference on surface science (ECOSS),
Parma, Italië

Voor meer informatie zie: <http://www.ecoss26.eu/>

23 - 25 September, 2009

13th European Space Mechanisms and Tribology
Symposium, Wenen, Oostenrijk

Voor meer informatie zie: <http://www.esmats.eu/viennalindex.php?whichPage=sponsors>

6 - 8 October 2009

SEMICON Europa 2009,
Dresden, Duitsland

Voor meer informatie zie: <http://www.semicon.europa.org/index.htm>

18 - 23 October, 2009

13th European Conference on Applications of
Surface and Interface Analysis, Anatolya, Turkije

Voor meer informatie zie: <http://www.allconferences.com/conferences/2008/20081014054832/>

18 - 21 October 2009

23rd International Conference on Vacuum Web
Coating, Amelia Island, Florida, USA

Voor meer informatie zie: <http://www.aimcal.org/association/ftpapers.asp>

8 - 13 November, 2009

AVS 56th International Symposium,
San Jose, CA, USA,

Voor meer informatie zie: <http://www2.avs.org/symposium/AVS56/pages/info.html>

30/11 - 4/12, 2009

Materials Research Society Fall Meeting,
Boston, MA, USA,

Voor meer informatie zie: http://www.mrs.org/s_mrs/sec.asp?CID=9546&DID=198609

oxygen systems will be examined in order to get an insight in the behaviour of this important parameter.

4. Conclusion

We described a method to calculate the sticking coefficient of O₂ on the deposited material, during reactive magnetron sputtering. The method is applicable for other systems and will enable to get more quantitative data to model the reactive magnetron sputtering process. Using mass spectrometry a local, effective pressure of O₂ at the position of the sample during reactive sputtering was determined as $(5.26 \pm 0.44) \times 10^{-6}$ mbar. Furthermore the sticking coefficient of O₂ during the reactive magnetron deposition of Al is calculated as $= 0.107 \pm 0.032$, a value which is higher than values estimated from chemisorption studies.

Acknowledgements

This work was conducted in the scope of the SBO project 60030, supported by the Institute for the Promotion of Innovation through Science and Technology in Flanders (IWT-Vlaanderen). One of the authors (S.M.) acknowledges the Research Foundation of Flanders (FWO-Flanders) for financial support.

References

- [1] W. P. Leroy, S. Mahieu, R. Persoons, and D. Depla, Plasma Process. Polym. Published online 19 Mar 2009, DOI 10.1002/ppap.200932401.
- [2] W. D. Westwood, Sputter Deposition (AVS, New York, 2002).
- [3] S. Berg, H. O. Blom, T. Larsson, and C. Nender, J. Vac. Sci. Technol. A-Vac. Surf. Films 1987, 5, 202.
- [4] S. Berg, T. Nyberg, and T. Kubart, in Reactive Sputter Deposition, edited by D. Depla and S. Mahieu (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
- [5] D. Depla, S. Heirwegh, S. Mahieu, and R. De Gryse, Journal of Physics D-Applied Physics 2007, 40, 1957.
- [6] W. Moller and D. Guttler, J. Appl. Phys. 2007, 102, 11.
- [7] T. Kubart, O. Kappertz, T. Nyberg, and S. Berg, Thin Solid Films 2006, 515, 421.
- [8] D. Depla, S. Mahieu, and R. De Gryse, in Reactive Sputter Deposition, edited by D. Depla and S. Mahieu (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
- [9] R. Snyders, M. Wautelet, R. Gouttebaron, J. P. Dauchot, and M. Hecq, Thin Solid Films 2003, 423, 125.
- [10] D. Mao, K. Tao, and J. Hopwood, J. Vac. Sci. Technol. A-Vac. Surf. Films 2002, 20, 379.
- [11] E. Kusano, S. Baba, and A. Kinbara, J. Vac. Sci. Technol. A-Vac. Surf. Films 1992, 10, 1696.
- [12] Handbook of Chemistry and Physics, 78 ed. (CRC Press, New York, 1997).
- [13] H. Brune, J. Winterlin, J. Trost, G. Ertl, J. Wiechers, and R. J. Behm, J. Chem. Phys. 1993, 99, 2128.
- [14] L. Osterlund, I. Zoric, and B. Kasemo, Physical Review B 1997, 55, 15452.
- [15] V. Zhukov, I. Popova, and J. T. Yates, Surf. Sci. 1999, 441, 251.
- [16] P. O. Gartland, Surf. Sci. 1977, 62, 183.
- [17] W. H. Krueger and S. R. Pollack, Surf. Sci. 1972, 30, 263.
- [18] M. C. G. Passeggi, L. I. Vergara, S. M. Mendoza, and J. Ferron, Surf. Sci. 2002, 507, 825.

Your European Vacuum supplier



VACUUM TECHNOLOGY
Hositrad

De Wel 44
3871 MV Hoevelaken
Holland

Postbus 114
3870 CC Hoevelaken
Holland

phone (+31) 33 - 2537210 - fax (+31) 33 - 2535274
info@hositrad.com - www.hositrad.com

Orgaan van de Nederlandse Vacuumvereniging