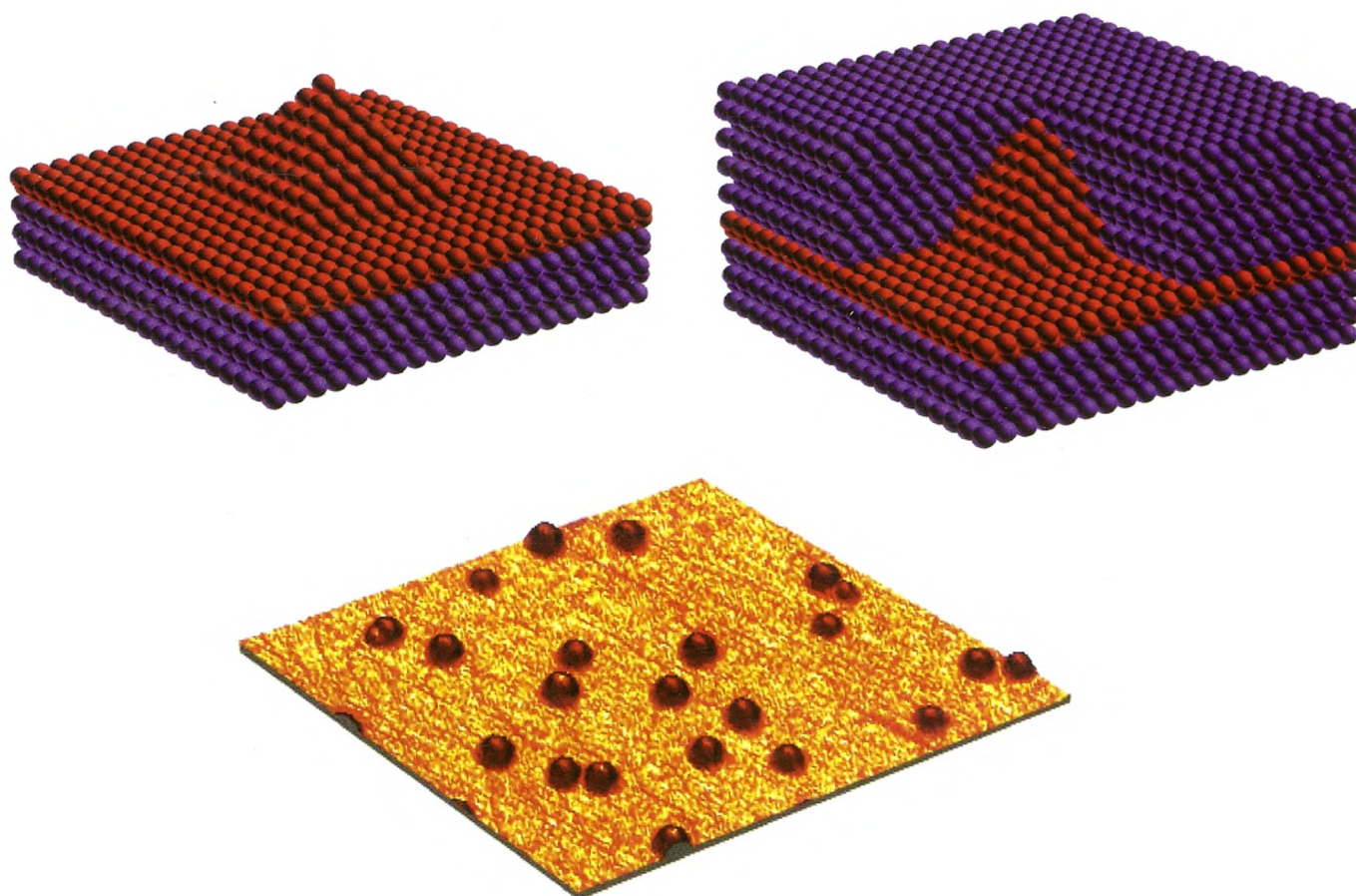




- TEMANUMMER – NANOSCIENCE OG NANOTEKNOLOGI •
- GAMMA ASTRONOMI MED INTEGRAL • VENUSPASSAGEN •

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

Ørsted Laboratoriet, Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af
Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Dansk Geofysisk Forening
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion
Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.)
Dansk Rumforskningsinstitut
Michael Cramer Andersen (nyhedsred.)
Astronomisk Observatorium, KU
Camilla Bacher
Kemisk Institut, KU
Jørgen Friis Bak
Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen
Torsten Freltoft
Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Svend E. Rugh

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 150 kr/år.
Tillæg for forsendelse udenfor Danmark.

Annoncepriser
1/1 side 3000 kr
1/2 side 1600 kr
1/4 side 1000 kr
Farvetillæg 1800 kr

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale. Henv. om annoncer til redaktøren, tlf. 35 32 57 32 eller 28 91 87 74. Henv. vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

Oplag: 3.000. Tryk: P. J. Schmidt A/S, Vojens. ISSN 0905-8893



Produktionsplan
Nr. 3-04 udkommer ca. 15. september
Nr. 4-04 udkommer ca. 15. november
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages mindst to måneder før.

Indhold:

Nanoscience og nanoteknologi <i>Flemming Besenbacher</i>	3
Organiske halvleder-nanoaggregater <i>Jonathan Brewer og Horst-Günter Rubahn</i>	5
Nano-optik <i>Kjeld Pedersen, Sergey I. Bozhevolnyi og Thomas Garm Pedersen</i>	8
Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse	12
Funktionelle nanoklynger: nanoreaktivitet og nanoluminiscens <i>F. Besenbacher, A. Nylandsted Larsen, B. Bech Nielsen og I. Stensgaard</i>	13
Mekanik på nanoskala: forbedring af fiberkompositters egenskaber <i>Bent F. Sørensen og Stefanie Feih</i>	18
Den molekylære transistor <i>Per Hedegård</i>	21
NanoNord – en nanoteknologisk virksomhed <i>Michael Cramer Andersen</i>	25
Nanoteknologi i cancerbehandling <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	26
Ultratynde film på silicium <i>Per Morgen og Sven Tougaard</i>	27
Kan et metal være en glas? <i>Nini Pryds</i>	28
Tidens paradoks <i>Michael Cramer Andersen</i>	32
Nyt fra Astronomisk Selskab	34
Nanoteknologi på DTU <i>Jens K. Nørskov, Jørn M. Hvam, Jakob Schiøtzt, Theodor Nielsen, Anders Kristensen og Jens Ulstrup</i>	35
KVANT-nyheder <i>Michael Cramer Andersen</i>	43
Gamma astronomi med INTEGRAL <i>Niels Lund</i>	45
Venuspassagen den 8. juni 2004 <i>Camilla Bacher</i>	Bagsiden
TEMANUMMER OM NANOSCIENCE OG NANOTEKNOLOGI	

I dette nummer af Kvant har vi taget emnet "nanoscience og nanoteknologi" op, og vi præsenterer bl.a. eksempler på forskningsaktiviteter med udgangspunkt i fysikmiljøerne på Københavns Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, RISØ, Syddansk Universitet, Aarhus Universitet og Aalborg Universitet. Forsidebilledet viser skematisk dyrkning af InAs på GaAs. Dyrkes mere end et par monolag, samler InAs sig i øer (pyramider) for at minimere den elastiske energi (billedet øverst til venstre). Dyrkes et dæklag GaAs herpå, dannes InAs/GaAs kvantepunkter (billedet øverst til højre). Det nederste billede viser et AFM (Atomic Force Mikroskop) billede af InAs kvantepunkter før dyrkning af dæklag.
Læs mere om kvantepunkter i artiklen af Jens K. Nørskov og hans medarbejdere på side 35.

Nanoscience og nanoteknologi

Flemming Besenbacher, Interdisciplinært Nanoscience Center (iNANO) samt Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Ordet nanoteknologi, der blev introduceret af japaneren Norio Taniguchi i 1971, kobler en nanometer – en milliontedel af en millimeter – sammen med teknologi. Nano blev dog først for alvor et verdensomspændende *buzz word*, da Bill Clinton i sin tale om nationens tilstand i januar 2000 præsenterede det ambitiøse “National Nanotechnology Initiative”. Satsningen giver årligt de amerikanske forskningsmiljøer en saltvandsindsprøjtning på 700–800 mio. USD. Siden har mere end 35 lande igangsat forskningsaktiviteter på området, således at nanoteknologi i dag er slået igennem som et centralt satsningsområde i eksplosiv vækst over hele verden. Det skyldes ganske enkelt, at nanoteknologi formodes at kunne føre til den næste industrielle revolution.

Men hvad er nanoteknologi egentlig? Det handler om at kunne designe, fremstille og kontrollere materialer, komponenter og maskiner med dimensioner på en skala fra 0,1–100 nanometer. Ved at styre opbygningen af materialer atom for atom eller molekyle for molekyle vil man kunne designe og konstruere unikke materialer med nye og ofte overraskende egenskaber, som ikke kan opnås på andre måder.

Nanoteknologi er et interdisciplinært område, der involverer fagområderne fysik, kemi, materialevidenskab, molekylærbiologi, biologi og medicin, og mange af de mest vidtrækkende anvendelsesmuligheder ligger netop i de tværfaglige områder: nye biokompatible materialer til medicinske implantater, lægemidler med færre bivirkninger doseret fra nano-containerne rettet mod udvalgte celler, mindre og hurtigere komponenter til computere og kommunikationsteknologi, nye og bedre konstruktionsmaterialer, nye kemiske og biologiske sensorer eller “lab-on-a-chip”-systemer, miljøvenlig produktion af materialer, nye katalysatorer til miljøformål eller energiteknologi og nye energilagringssystemer.

Selv om nogle af de ovennævnte anvendelser først vil kunne realiseres langt ude i fremtiden, vil de ganske givet komme. Området er karakteriseret ved en meget tæt kontakt mellem grundforskningsmiljøer og industri, og kendte teknologier er på vej ind i nano-området: mikroelektronik er allerede nanoelektronik, optik og fotonik bevæger sig mod nanooptik, og nanoteknologi åbner mange muligheder inden for bioteknologi, medicin og fødevarerområderne.

Det grundforskningsmæssige fundament benævnes ofte nanoscience eller nanovidenskab. Et paradigmeskift kom i 1980 med udviklingen af en helt ny type mikroskop (scanning-tunneling-mikroskopet) med en så høj opløsningsevne, at det er muligt at “se”

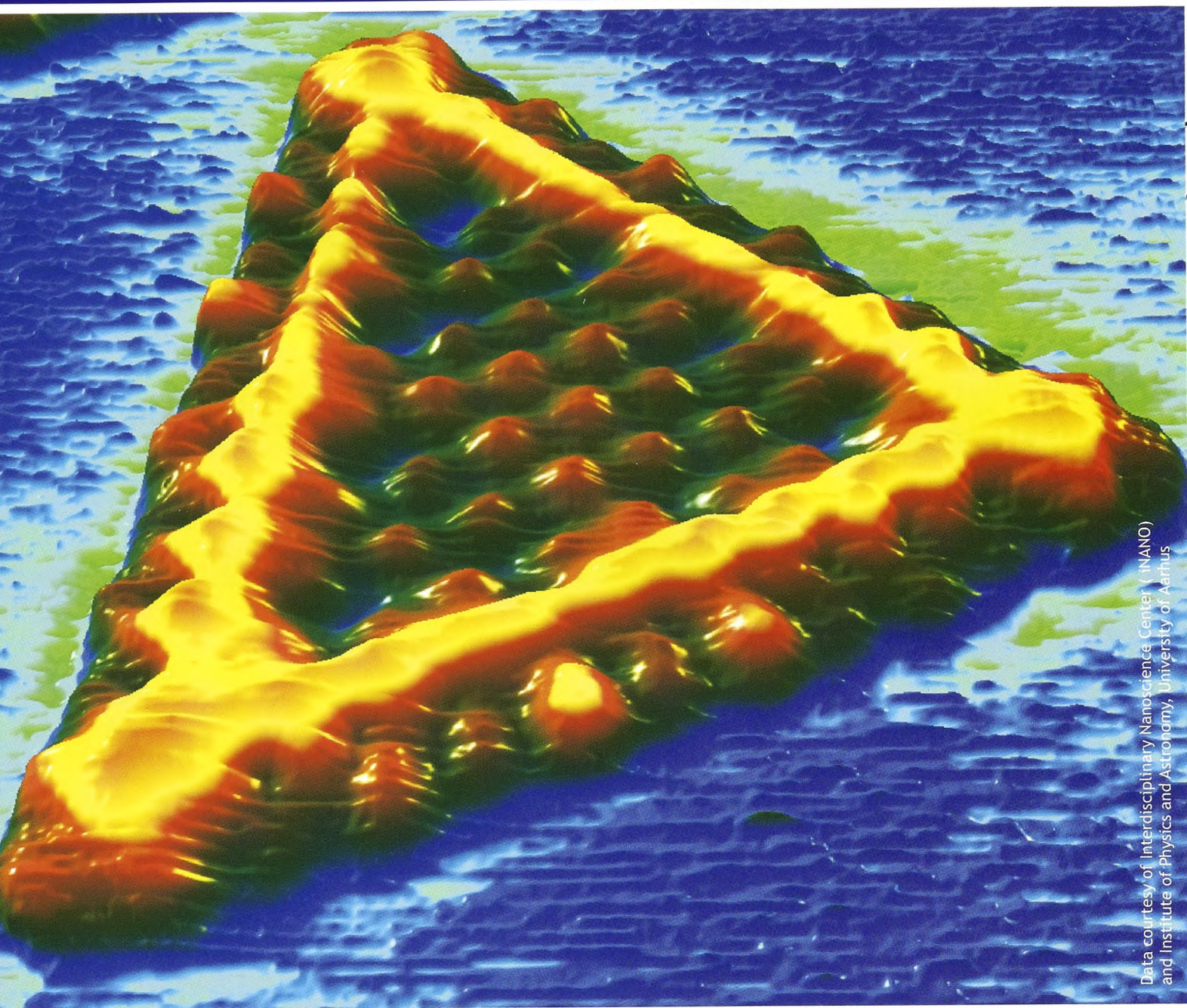
enkelte atomer og molekyler på overfladen af et materiale. Samtidig er det med disse mikroskoper muligt at flytte rundt med enkelte atomer og molekyler og derved designe nye spændende strukturer. Metoden er dog alt for langsom til produktionsformål og dermed kun af grundvidenskabelig interesse, så udviklingen af nye “top-down” og “bottom-up” syntesemetoder er afgørende for en storskalaproduktion af nanoteknologiske komponenter. Der arbejdes især på at skabe selvsamlende systemer, hvor de enkelte dele er forprogrammerede til, hvordan de skal placere sig i forhold til hinanden, og i denne sammenhæng er der stor inspiration at hente fra den biologiske verden.

Et vigtigt aspekt af idegrundlaget er nedbrydningen af konventionelle fagskel i tværvideenskabelige projekter. Det har vist sig, at utraditionelle samarbejder, hvor f.eks. fysikere, der er stærke i instrumentering, arbejder sammen med molekylærbiologer eller læger, har ført til nye og interessante resultater. I samme ånd arbejder f.eks. kemikere og molekylærbiologer på selvsamlende systemer, der udnytter naturens genkendelsesprincipper til konstruktion af funktionelle systemer.

I forbindelse med den nationale satsning er det afgørende, at der uddannes en ny generation af ingeniører og naturvidenskabelige kandidater med tilstrækkelig specialviden til, at de kan være katalysatorer til at få nanoteknologi sat på dagsordenen i Danmark. Netop på uddannelsesområdet har Danmark været foregangsland og Aarhus, Københavns og Aalborg Universiteter samt DTU og SDU har opnået Videnskabsministeriets tilladelse til at etablere nye forskningsbaserede, tværfaglige bachelor- og kandidatuddannelser.

Inden for forskningen rangerer flere danske grupper allerede i den internationale elite og kan forventes at levere fremragende resultater, såfremt de fornødne bevillinger er til stede. Regeringen har p.t. afsat 135 mio. kr. af UMTS-midlerne til at styrke forskningen, hvoraf 75 mio. kr. blev uddelt til tre nationale nanocentre i 2003. Senest har regeringen med lanceringen af den nye “Fonden for Højteknologisk Udvikling”, hvor nanoteknologi er ét af tre nationale satsningsområder, yderligere medvirket til at sætte nano på dagsordenen. Fonden skal medvirke til at omsætte forskningen til nanoteknologi og dermed starte produktionen af nye produkter til gavn og glæde for det danske samfund. Derudover forventes teknologien at skabe nye højteknologiske arbejdspladser. Fremskrivninger peger på ca. 2 mio. nye arbejdspladser på verdensplan i 2015, her af ca. 400.000 i Europa.

Kom tættere på sandheden



Data courtesy of Interdisciplinary Nanoscience Center (iNANO)
and Institute of Physics and Astronomy, University of Aarhus

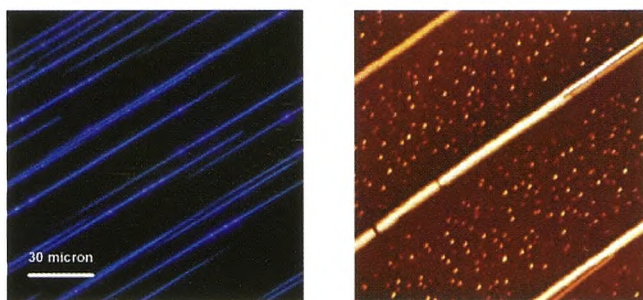
Spørg dig selv, hvorfor forskere i mere end 29 lande har valgt The Scanning Probe Image Processor, SPIP™ som deres foretrukne værktøj til billedbehandling. Måske er det fordi ingen anden forskningssoftware giver dig flere muligheder inden for kalibrering, korrektion, analyse og visualisering af billeder på nanoskala. Eller måske er det fordi de svar du søger, aldrig er længere væk end et par klik med musen. Uanset hvad du søger, kommer du altid lidt tættere på sandheden med SPIP™.

Ring på 4525 5885 og få en snak om dine muligheder eller hent en gratis demoversion på www.imagemet.com

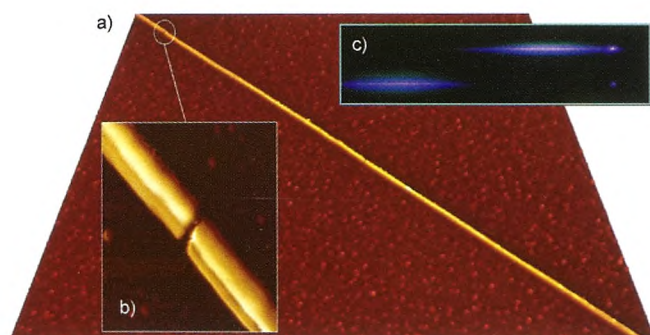
Organiske halvleder-nanoaggregater

Jonathan Brewer og Horst-Günter Rubahn, Fysisk Institut, Syddansk Universitet, Odense.

Den hurtige udvikling indenfor formindskelse af optoelektroniske komponenter og indenfor fotonik har skabt et voksende behov for udvikling, karakterisering og sammensætning af optoelektroniske komponenter med karakteristiske størrelser på nanometer-skala. Blandt de mulige anvendelser kan nævnes organiske dioder, som udsender polariseret lys, og organiske halvlederlasere. En dyb forståelse af optiske og elektroniske processer i nano-aggregater er derfor vigtig.



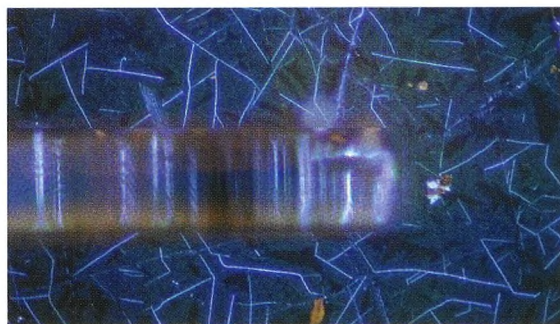
Figur 1. Til venstre et billede (mikroskopi) af para-hexaphenyl nanofibre på mica. Det blå lys følger excitationen af aggregaterne med UV lys ($\lambda = 360$ nm). Til højre et $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ billede af den samme prøve lavet med atomar kraft mikroskopi (AFM).



Figur 2. Lysledende nanofibre. a) AFM billede ($25 \times 25 \mu\text{m}^2$), b) forstørrelse af huller i en nanofiber. c) mikroskopi billede af en nanofiber exciteret tæt på et hul (øverste billede) og $90 \mu\text{m}$ væk fra hullet (nederste billede).

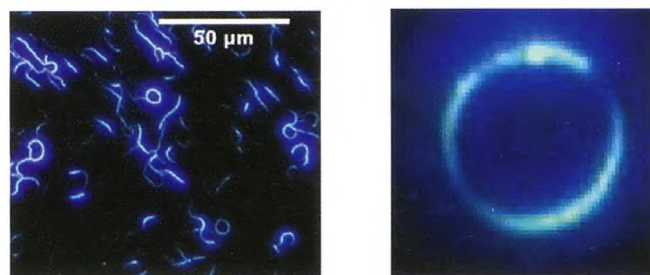
En lovende metode til fremstilling af enkeltstående aggregater af nanostørrelse udgøres af en kombination af selvorganiserende vækst og mere traditionel kontrol af vækstbetingelserne. Det gør det muligt at lave ordnede grupper af individuelle elektroniske en-

heder, hvor vi kan kontrollere størrelsen af og afstanden mellem de enkelte enheder samt deres indbyrdes orientering. Organiske molekyler som para-



Figur 3. Mikroskopi-billede af en konventionel lysleder (diameter $140 \mu\text{m}$) og nanofiber på en alkali-krystal.

phenylener er gode byggesten for nano-aggregater, idet de har en naturlig præference for selvorganiserende vækst, en udtalt dikroisme, effektiv udstråling ("luminescens") af blåt eller grønt lys, samt den egenskab, at farven af deres luminescens nemt kan ændres ved at ændre længden af molekylet. Når molekylerne anbringes på en dielektrisk overflade er deres molekyllære akse enten parallel med eller vinkelret på overfladen. Molekylernes orientering på overfladen kan kontrolleres ved at vælge de vækstbetingelser (fluksen af indkommende molekyler samt overfladetemperatur), som passer til den valgte overflade. Da den elektriske tærskelspænding for elektroluminescens er væsentlig lavere for molekyler, som er ligget parallelt med overfladen, end for molekyler, som står vinkelret på overfladen, er det vigtigt at kunne kontrollere orienteringen af molekylerne under deres vækst.

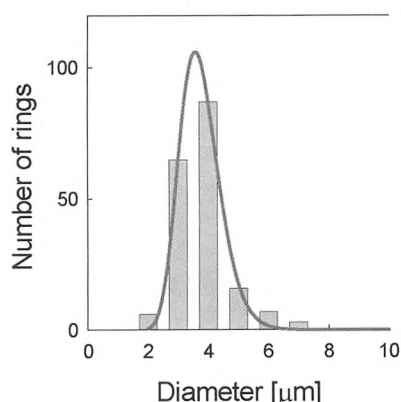


Figur 4. Mikroskopi-billeder af mikroringe på mica. Til højre ses en $7 \times 7 \mu\text{m}^2$ forstørrelse af en isoleret ring.

På Fysisk Institut har vi vist at OMBE ("organic molecular beam epitaxy") vækst af para-hexaphenylene molekyler på en opvarmet muskovit-overflade (glimmer) resulterer i isolerede krystallinske nanofibre. Fibrene består af et parallelt lag af molekyler som

ligger langs de mikroskopiske dipoler på muskovit-overfladen, se figur 1 [1]. Aggregaternes tykkelse er fra ti til nogle hundrede nanometer, mens de har længder på op til mere end en millimeter. Forholdet mellem højden og bredden af nanofibre kan kontrolleres næsten uafhængigt af hinanden. På grund af den stærke dipol-binding mellem de enkelte molekyler danner nanofibre store områder (cm^2), hvor fibre er parallelt orienterede.

Den epitaxielle selvorganiserende vækst af nanofibre er drevet af molekylernes polarisationsevne, det elektriske felt på overfladen samt det forhold, at molekylerne har en større sandsynlighed for at vokse i en specifik retning. Nanofibre har enestående egenskaber, som gør dem egnede til brug i fysik, teknologi, kemi og biologi. Da fibrenes længder kan være helt op til en millimeter, er det muligt at observere dem med konventionel optisk mikroskopi samtidig med at man kan udnytte deres nanometer-dimensioner. Takket være fibrenes længde er det muligt at koble dem til mere komplekse systemer samtidigt med at de bevarer deres nanoskopiske (dvs. "nær-felts") egenskaber. Faktisk er koblingen mellem mikroskopiske og nanoskopiske dimensioner et af de største problemer i moderne fotonik og vore nanofibre kan muligvis være med til at løse dette problem.



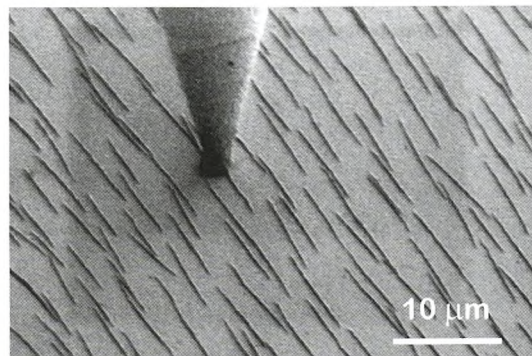
Figur 5. Fordeling af ringenes størrelse på mica.

Nanofibres vækst er meget følsom overfor fluksen af indkommende molekyler samt overfladens temperatur. Lokale ændringer i temperatur gør det derfor muligt at få aggregaterne til at vokse på veldefinerede områder på en overflade. Vi har demonstreret lokal vækst ved at opvarme overfladen med en Argon ion-laser (bølgelængde 514 nm) [2]. Ved at kombinere laser-opvarmning med den rigtige fluks af molekyler er det muligt at styre de karakteristiske dimensioner (højde, bredde og længde) samt den relative afstand mellem aggregaterne.

Som et første skridt i udvikling af anvendelser af nanofibre har vi med en kombination af lokal eksitations- og fluorescens mikroskopi vist, at de enkelte fibre kan virke som nanostørrelse-bølgeledere for blå lys (figur 2) [3,4]. Deres diameter kan nemt varieres over området fra ikke-bølgeledning til ledning

med en enkelt elektromagnetisk svingningsmode.

Figur 2a viser et AFM ("Atomic Force Microscopy") billede af bølgeledning i nanofibre. Lyset i fiberen er genereret ved at fokusere ultraviolet lys på den (figur 2c). Lyset bevæger sig langs fiberen og stråler ud gennem huller i fiberen med størrelser på omkring 10 nanometer. Ved at ændre afstanden mellem eksitations-lysets impakt og hullerne i fiberen ser vi, at lyset ledes over en afstand på mindst 100 μm .



Figur 6. Elektron mikroskopi-billede af en SNOM spids (scanning near field optical microscopy) som direkte måler lyset fra nanofibre. (H.Sturm, BAM, Berlin).

På baggrund af disse eksperimenter har vi udviklet en klassisk elektrodynamisk model som kan beskrive fibrenes bølgeledningsegenskaber. Dette gør det muligt for os at finde den komplekse dielektriske funktion af organiske aggregater af nanostørrelse. Kendskab til denne funktion er vigtigt for at kunne komme med forudsigelser om de optiske egenskaber af mere komplekse systemer.

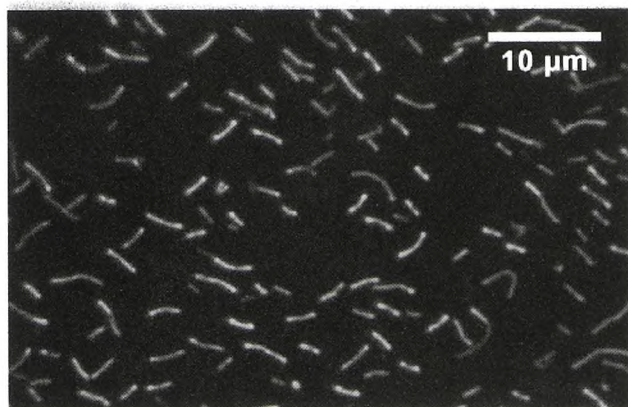
Fabrikationen af nanostørrelse-lysledere er et vigtigt skridt i retningen af at kunne skabe nanostørrelse optoelektroniske kredsløb. Dette kan ses i figur 3 hvor man kan sammenligne størrelsen af en konventionel lysleder med de nye enkelt-mode lysledende nanofibre.

Nanofibrenes ulineære optiske respons tillader os desuden at bestemme orienteringen af molekulære domæner langs deres akse. Resultaterne kompletterer morfologiske målinger lavet med AFM.

Da væksten af nanoaggregaterne er drevet af elektriske dipolfelter på overfladen af underlaget kan man ved at fjerne felterne få vækst af aggregater med forskellige former. En eksempel er vist i figur 4. Efter at have skyllet muskovitoverfladen med vand eller methanol for at fjerne nogle af overfladens kationer, ser vi dannelse af bukkede fibre samt ringe af mikrometerstørrelse, som har en smal størrelsesfordeling (figur 5). Rumlig opløst femtosekund to-foton afbildning af de enkelte ringe har afsløret at de er én-krystallinske [5].

Vi har altså demonstreret, at komplekse organiske aggregater kan laves forholdsvis nemt ved vakuumdeponering på modificerede eller funktionaliserede overflader. En anden måde at skabe mere komplekse aggregater på er at flytte dem efter at de er blevet dannet. For at gøre dette er det nødvendigt at flytte en-

hederne langs overfladen eller til et helt andet underlag. Figur 6 viser, at det er en svær opgave, da der er et misforhold mellem størrelsen af typiske manipulationsredskaber (som f.eks. en spids genstand) og nanofibrene. Indledende forsøg med at flytte nanofibre har dog vist, at det er muligt. Disse forsøg er rettet imod at lave organiske felt-effekt transistorer og lysudsendende dioder, som skal udnytte højt-krystallinske to-dimensionale halvleder-lag. For at kunne optimere komponenternes egenskaber er det nødvendigt at undersøge nanofibres vækst med andre organiske molekyler. Figur 7 er et billede af nanonåle lavet af α -4T molekyler, som har en kraftig grøn luminescens.



Figur 7. α -4T nanonåle.

Afsluttende vil vi bemærke, at nanofibrene i princippet udviser potentiale for opbygning af en ny type organisk nanolaser, idet materialet, som er et højt-forstærkende halvledende medium, effektivt kan pumpes af eksterne fotoner eller med elektroner. Support-substratet har lav absorption og fibre yder stærk "confinement" på grund af deres form, samt en tilstrækkelig tilbagekobling ved enderne eller ved brudsteder, som kan laves forskellige steder langs fibre.

Referencer:

- [1] Balzer F. og Rubahn H. G. (2001) "Dipole-Assisted Self-Assembly of Light-Emitting p-nP Needles on Mica.", *Appl. Phys. Lett.*, bind 79, side 3860–3862.
- [2] Balzer F. og Rubahn H. G. (2002) "Laser-Controlled growth of needle-shaped organic nanoaggregates" *Nano Letters*, bind 2, side 747–750.
- [3] Balzer F., Bordo V. G., Simonsen A. C. og Rubahn H. G. (2003) "Isolated hexaphenyl nanofibers as optical waveguides" *Appl. Phys. Lett.*, bind 82, side 10–12.
- [4] Balzer F., Bordo V. G., Simonsen A. C. og Rubahn H. G. (2003) "Optical waveguiding in individual nanometer-scale organic fibers", *Phys. Rev. B*, bind 67, side 115408.
- [5] Balzer F., Beermann J., Bozhevolnyi S. I., Simonsen A. C., og Rubahn H. G. (2003) "Optically active organic microrings", *Nano Letters*, bind 3, side 1311–1314.



Jonathan Brewer Ph.D.-studerende ved Fysisk Institut, Syddansk Universitet.



Horst-Günter Rubahn er lektor ved Fysisk Institut, Syddansk Universitet.

PFEIFFER VACUUM

Forskerens

**"One-Stop-Shop"
Massespektrometer:
massrange op til 2048 amu**

**Alt nødvendigt tilbehør:
Pumpesystem, In-let system,
kammer, ventiler, skueglas,
gennemføringer, fittings og
tryksensorer**

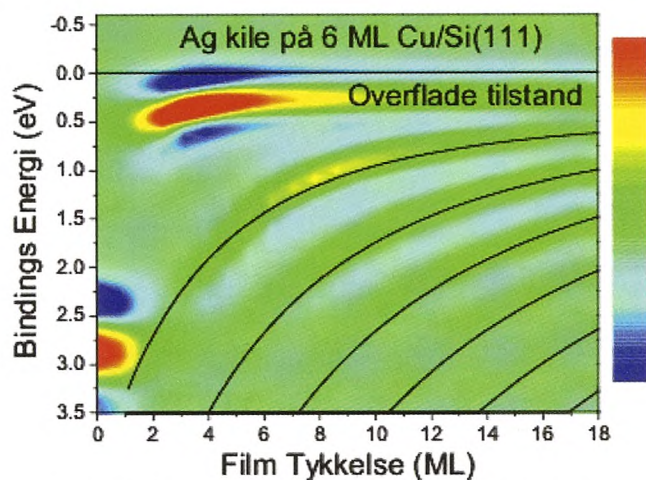
Helium læksøger QualyTest™

Tel. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk

Nano-Optik

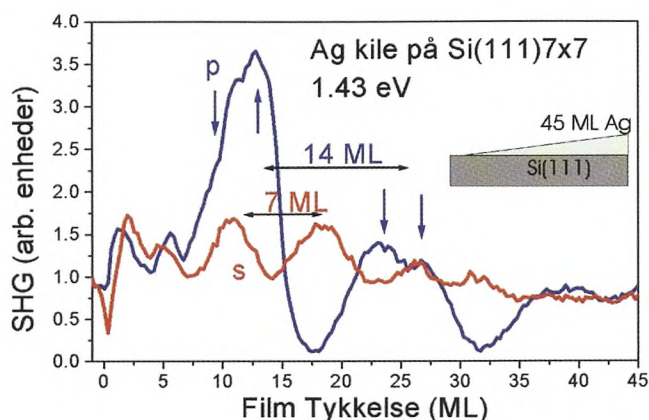
Kjeld Pedersen, Sergey I. Bozhevolnyi og Thomas Garm Pedersen,
Institut for Fysik og Nanoteknologi, Aalborg Universitet.

Selv om bølgelængden for synligt lys ligger ved den øvre ende af den størrelsesskala, som normalt regnes for nano-området, giver nanoskala-geometriske strukturer anledning til en række interessante nye optiske effekter. Elektroniske overgange ligger typisk i det optiske område og forskellige former for optisk spektroskopi kan derfor bidrage til undersøgelser af størrelseseffekter i nanostrukturers elektroniske egenskaber. Som et eksempel behandles her ulineære optiske egenskaber af metalliske kvantebrønde. Endvidere giver lysspredning fra nanostrukturer anledning til nanoskala-varianter i optiske felter. Det fører til fascinerende fænomener så som feltlokalisering og meget kraftig feltforstærkning med en række nye teknologiske anvendelsesmuligheder til følge. Vi behandler her plasmoner i nanostrukturer, som kan danne grundlaget for ultrakompakte multifunktionelle fotoniske integrerede kredse med et bredt felt af anvendelser fra bio- til informationsteknologi.

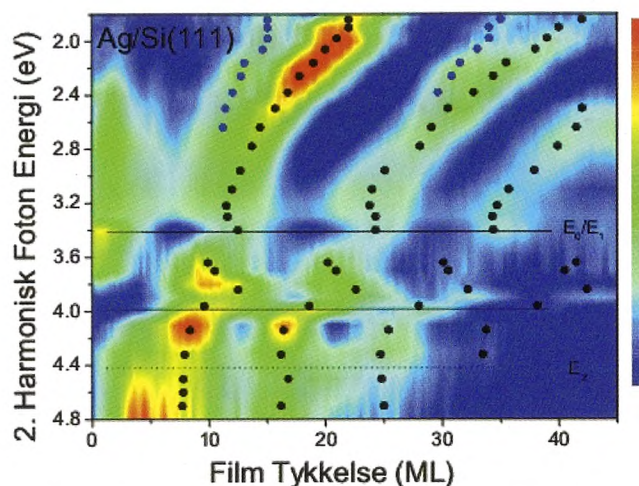


Figur 1. Konturplot af valensbåndsspektre optaget som funktion af tykkelsen af en kileformet Ag film deponeret på 6 lag Cu, som igen er deponeret på en ren Si(111) 7×7 overflade. Kurverne repræsenterer kvanteniveaurnes placering beregnet med en resonator model (se teksten).

I undersøgelserne indgår to optiske teknikker, som sætter os i stand til at karakterisere strukturer med bedre opløsning end det, der opnås med traditionel optisk spektroskopi. Den første teknik er anden harmonisk generation (SHG), en anden-ordens ulineær optisk proces, som ikke kan foregå i systemer med centrosymmetri. Kubiske materialer som Si, Ge og metaller giver derfor ikke anledning til bulk bidrag til SHG. For strukturer byggende på sådanne materialer er SHG derfor en yderst følsom teknik til karakterisering af



Figur 2. SHG som funktion af tykkelsen af en sølv film på Si(111) 7×7 optaget med to forskellige polarisationsretninger.



Figur 3. Konturplot af SHG som funktion af tykkelsen af en sølv film optaget ved forskellige fotonenergier. Symbolerne viser positionen af maksima i de direkte måledata (se figur 2).

overflader, grænseflader og inhomogene systemer, ofte med en følsomhed ned til enkelte atomare lag [1]. Da lys samtidig har en stor vekselvirkningsdybde (sammenlignet med lavenergetiske elektroner typisk anvendt i overfladespektroskopi) er det muligt at probe begravede grænseflader. SHG er derfor en interessant teknik i forbindelse med nanostrukturer, hvor overflader og grænseflader dominerer egenskaberne. Den anden teknik er scanning nærfelts-optisk mikroskopi (SNOM), hvor et billede opbygges ved at skanne en skarp fiberspids langs overfladen [2]. Ved anvendelse af denne teknik kan optiske felter dannet af og bundet til nanostrukturer aftastes med en opløsning, som ikke

er begrænset af lysets bølgelængde. Faktisk er SNOM den eneste teknik, som gør det muligt at kortlægge lysudbredelse i plasmon-baserede nanokredsløb.

Ulineær optik på metalliske kvantebrønde

Metalfilm med tykkelser fra et enkelt lag atomer og op til 100 lag udviser elektroniske egenskaber, som gradvis nærmer sig velkendte bulk egenskaber. Hvis filmen har en veldefineret tykkelse inden for det område, som probes, vil den virke som en kvantebrønd med diskrete værdier for elektronernes energier. En første tilnærmelse, som gengiver hovedtrækkene i disse energiniveaus afhængighed af filmens tykkelse, fås ved en simpel potentialbrønd, som den kendes fra standard kvantemekanikbøger. Eksperimentelt er disse kvantefænomener observeret i en række egenskaber (ledningsevne, elektron-tunnelering, mm.), men de mest overbevisende resultater er opnået ved hjælp af vinkelopløst fotoemission, hvor toppe i valensbåndspektre direkte viser kvantiseringen [3]. Derfor er valensbåndsspektroskopi i dette arbejde anvendt til at udvikle teknikken til deponering af tynde film med henblik på at opnå bedst mulig kvantisering. Figur 1 viser konturplot af valensbåndspektre optaget som funktion af tykkelsen af en kileformet Ag film deponeret på 6 lag Cu, som igen er deponeret på en ren Si(111) 7×7 overflade [4]. Det tynde Cu lag danner en reageret fase, som mindsker strain i lagene og dermed giver en bedre krystalstruktur af Ag laget. Det fører til den velkendte Shockley overflade tilstand ca. 0,3 eV under Fermi-niveauet. Uden det tynde Cu mellemlag er overfladetilstanden skiftet over Fermi-niveauet og kan dermed ikke observeres i fotoemission. Under overfladetilstanden ses kvanteniveauerne, som konvergerer mod Ag(111) båndkanten for voksende film tykkelse. Kurverne er opnået via Bohr-Sommerfelt kvantiseringsbetingelsen:

$$2k(E)d + \Phi(E) = 2n\pi, \quad (1)$$

hvor E er energien, k er størrelsen af bølgevektoren vinkelret på overfladen, d er filmens tykkelse, Φ er fase-skiftet ved refleksion ved filmens to grænseflader og n er et helt tal. Det høje signal omkring 3 eV for substratet skyldes Cu's d-bånd.

Tynde film er interessante objekter for SHG, idet de to forskellige grænseflader forventes at dominere den ulineære optiske proces. En af udfordringerne er derfor at adskille de to grænsefladebidrag og uddrage information om den begravede grænseflade. Samtidig er det interessant at undersøge kvantiserede tilstande med optiske metoder, da energiforskellene mellem tilstandene (se figur 1) netop passer til optiske excitationer. For metalfilm er der ingen observationer af kvanteeffekter med lineær optik på grund af det store Drude-bidrag til de lineære egenskaber. SHG derimod viser klare kvanteeffekter i form af oscillationer i signalet som funktion af filmens tykkelse som vist på figur 2. De to kurver på

figur 2 repræsenterer den ulineære polarisation vinkelret (p-polariseret) og parallel (s-polariseret) med overfladen. Oscillationerne kan kvalitativt forstås på baggrund af en simpel kvantebrønd, hvor energiniveauerne bevæger sig nedad, og afstanden mellem dem mindskes, når brøndens tykkelse vokser [5,6]. For fastholdt fotonenergi går systemet derfor ind og ud af resonans, når filmens tykkelse varieres. På baggrund af den samme simple overvejelse forventes det, at perioden i oscillationerne vil være længere for lav fotonenergi end for høj energi, hvilket også klart observeres (figur 3). Det er dog vigtigt at gøre sig klart, at den simple symmetriske kvantebrønd har centrosymmetri og derfor ikke giver anledning til SHG. Metalfilmene er imidlertid ikke symmetriske, og den simpleste version af en kvantebrønd kan kun benyttes til kvalitative overvejelser.

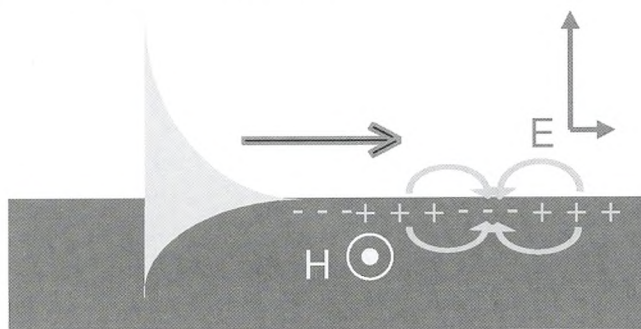
Oscillationerne i SHG som funktion af filmens tykkelse indeholder imidlertid detaljer, som afspejler de to grænsefladers bidrag til signalet. Periodelængden ved 1,4 eV for s-polariseret SHG er 7 ML mens den er det dobbelte for p-polariseret lys, dog med en tendens til to toppe i hver periode. Periodedoblingen kan kvalitativt forstås på følgende måde [7]: Antag at det ulineære felt genereret ved hver af de to grænseflader oscillerer med den grundlæggende periode (7 ML ved 1,4 eV) på grund af kvanteniveaurnes skift med tykkelsen. Bølgfunktionerne hørende til niveauerne er imidlertid skiftevis symmetriske og antisymmetriske, i det mindste for en symmetrisk kvantebrønd. Da SHG, i modsætning til lineær optik, er stærkt afhængig af bølgfunktionernes symmetri er det klart, at en periode i SHG må indeholde både en lige og en ulige funktion. Interferensen mellem bidragene fra de to grænseflader vil være destruktiv for den ene symmetri og konstruktiv for den anden. Dermed bliver perioden den dobbelte af perioden for feltvariationen ved den enkelte grænseflade. Generelt vil interferensen mellem de to grænsefladebidrag afspejle deres relative størrelser og faser. Når det s-polariserede signal i figur 2 ikke udviser interferenseffekter skyldes det, at signalet fra Si/metal grænsefladen er væsentlig større end overfladesignalet.

Figur 3 viser resultaterne af en række scan af p-polariseret SHG som funktion af tykkelsen af en kileformet Ag film på en Si overflade. Resultaterne er vist som konturplot, hvor data mellem målepunkter er interpoleret med henblik på at opnå en billede-lignende fremstilling. Symbolerne på figuren viser positionen af maksima i de direkte måledata. Repræsentationen med fotonenergien for resonancer (maksima i SHG) som funktion af tykkelsen er valgt fordi den svarer til den normale repræsentation af fotoemissionsdata. Det skal dog nævnes, at mens figur 1 direkte viser positionen af besatte kvantetilstande som funktion af tykkelsen afhænger energien for resonans i SHG både af den besatte begyndelsestilstand og den ubesatte sluttilstand. En direkte sammenligning af dispersionen af tilstande mellem de to teknikker er derfor kun mulig hvis posi-

tionen af et af niveauerne er uafhængig af tykkelsen.

For lave fotonenergier bliver perioden i SHG oscillationerne mindre med voksende fotonenergi som forventet for excitationer i en simpel kvantebrønd. Når energien nærmer sig 3,4 eV sker der en markant ændring i dispersionen af resonanserne. Denne energi falder sammen med det direkte båndgab i Si (E_0/E_1 kritisk punkt), hvor der opstår en resonans på Si/metal grænsefladen (husk at bulk Si ikke giver anledning til SHG). Resonanser ved denne energi kendes også fra den frie Si overflade og fra Si/oxid grænseflader. Et skift i resonanser observeres igen omkring 4,0 eV. I dette tilfælde falder energien ikke sammen med et kritisk punkt i bulk Si båndstrukturen, idet den næste overgang (E_2 kritisk punkt) her ligger ved 4,2 eV. SHG målingerne viser altså, at der ligger en resonans på Si/metal grænsefladen ved energier mellem resonanser forventet ud fra bulk strukturen.

Der er visse lighedspunkter mellem fotoemission og SHG med hensyn til den måde, begravede grænseflader kan undersøges på. Selv om de detekterede elektroner i fotoemission kommer fra de yderste par atomlag ved den frie overflade, afspejler dispersionen af kvantetilstandene elektronernes refleksion ved den begravede grænseflade. Fasen af grænsefladens refleksion af elektroner ændres f.eks. skarpt ved en båndkant for det underliggende materiale [3]. Den begravede grænseflade kan altså probes gennem de stående bølger i filmen. Ved SHG afspejler det tilsvarende energi-tykkelses-diagram de faseskift, som resonanser på den begravede grænseflade giver anledning til. Det sker gennem interferens mellem felterne fra grænsefladen og den frie overflade. SHG giver dermed oplysninger om optiske overgange lokaliseret til den begravede grænseflade.

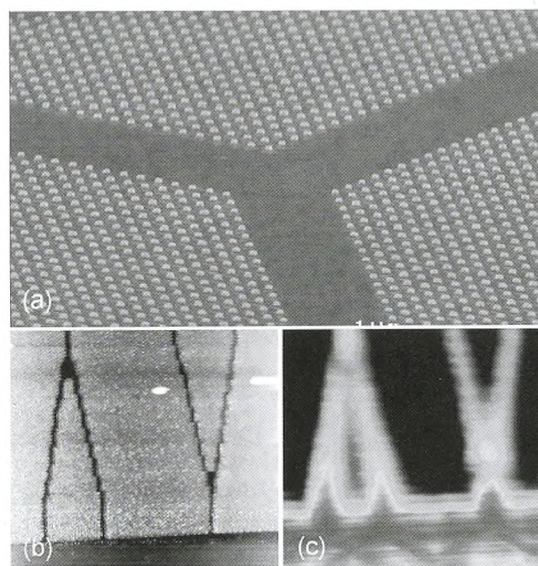


Figur 4. Schematisk repræsentation af plasmonfeltets fordeling nær en metal-dielektrikum grænseflade med orienteringen af det tilhørende elektriske og magnetiske felt samt elektronernes bevægelse nær overfladen.

Plasmoner

Overflade plasmon polaritoner (i det følgende blot plasmoner) er lysbølger koblet til oscillationer af frie elektroner i en leder, normalt et metal, hvor lyset udbreder sig langs en grænseflade mellem et metal og et dielektrisk materiale [8]. Plasmonerne er tæt bundet til metaloverfladen, hvor de har deres maksimale

styrke, og aftager eksponentielt ind i begge nabomedier (se figur 4). Typiske indtrængningsdybder er ~ 30 nm i metallet og 500 nm i luft, hvilket gør plasmonudbredelsen yderst følsom over for overfladeegenskaber og f.eks. tilstedeværelsen af nanopartikler på overfladen. Disse, ofte også metalliske, partikler spredte effektivt den indsendte plasmon over i divergerende plasmoner, hvorved det er muligt at manipulere plasmonfelter i overfladens plan [9]. Eksempelvis kan nanopartikler arrangeret i en ret linje virke som et effektivt mikrospejl for plasmonbølger, mens partikler placeret i en krum facon kan fokusere, reflektere dem og skabe et kraftigt lokaliseret elektromagnetisk felt på en givet valgt position på overfladen. Fra et faststoffysisk synspunkt er nanopartiklernes indflydelse på plasmonfeltets udbredelse analog til ioners perturbierende indflydelse på elektroner (todimensionale) bevægelse. Et periodisk gitter af nanopartikler vil altså sprede plasmoner på samme måde som det periodiske gitterpotentiale i krystaller spreder elektroner og danner energibånd adskilt af forbudte båndgab. Vi har foreslået at anvende disse forbudte udbredelsesområder (for bestemte bølglængdeintervaller) i periodisk strukturerede metaloverflader til at lokalisere og guide plasmoner i kanaler uden struktur inde i dette periodiske mønster [10]. Idéen har været at realisere nano-plasmon kredsløb analoge til mere velkendte fotoniske kredse baseret på fotoniske båndgabseffekter i dielektriske materialer med periodisk modulation af brydningsindekset [11].



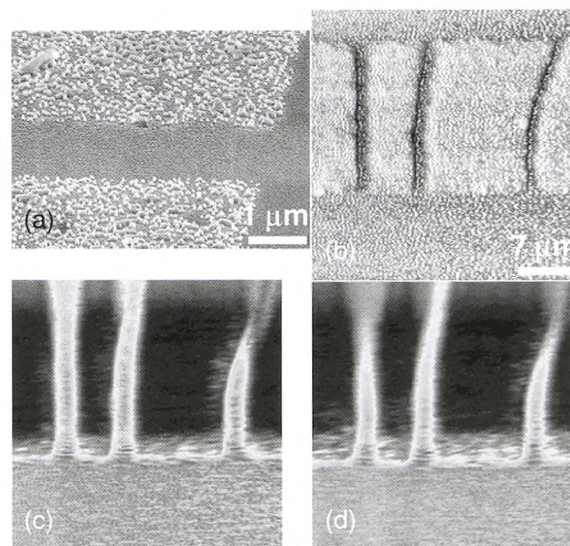
Figur 5. Demonstration af to plasmon båndgabsbaserede mikroskopiske komponenter: en "combiner" og en "Y-splitter". (a) Scanning electron mikroskop billede af en typisk "Y-splitter" udført i et 410 nm periodisk triangulært gitter bestående af 200 nm brede og 45 nm høje guld partikler på en 45 nm tyk guld film. Pseudofarveskala (b) topografisk og (c) optisk nærfelts billeder ($30 \times 30 \mu\text{m}^2$) optaget med en bølglængde på 737 nm for en 20° "combiner" og "Y-splitter" vist i (a).

I de første demonstrationer af nano-plasmon kredse baseret på båndgabseffekten anvendtes nærinfrarødt lys (700–800 nm) på guldfilm dækket med et 400 nm periodisk hexagonalt gitter af 200 nm brede og 50 nm høje guldpartikler fremstillet med elektronstrålelithografi. Ved hjælp af SNOM blev intensiteten af plasmoner langs overfladen og deres udbredelse i kanaler i dette gitter af defekter undersøgt. Vi har direkte observeret stærk refleksion af den indsendte plasmon med en bølgelængde på 780 nm i periodiske strukturer samtidig med dæmpning (til under 10 % af middelniveauet) inde i de periodiske strukturer for de to hovedorienteringer af gitteret. Den stærke bølgelængdeafhængighed af både refleksionen og dæmpningen i strukturen er et utvetydigt bevis på båndgabseffekter i disse strukturer. Uhindret udbredelse af plasmon linje-defekt modes i båndgabsstrukturer er også observeret for relativt store ($> 2 \mu\text{m}$) defekter. I efterfølgende eksperimenter har vi undersøgt tabene for plasmonmodes med en bølgelængde på 740 nm ved bøjninger af $2 \mu\text{m}$ brede kanaler i en struktur med 410 nm periode. Tabene ved en dobbelt bøjning på 15° er under 2 dB og stiger tilnærmelsesvis kvadratisk med bøjningsvinklen. Endelig har vi demonstreret mulighederne for at dele eller samle to modes over en afstand på $20 \mu\text{m}$ (figur 5), hvilket åbner muligheder for at opnå høj integration i plasmon baserede fotoniske båndgabskredse. Der er helt klart vide muligheder for, at fremtidige undersøgelser og optimeringer af strukturelle parametre kan føre til betydelige forbedringer i forhold til de effekter, der er observeret her, og dermed anvendelsesmuligheder af plasmon baserede båndgabsstrukturer på linje med de, der er foreslået for konventionelle båndgabsstrukturer [11].

Anderson lokalisering af elektroner i et tilfældigt potentiale kan også emuleres med plasmoner i en tilfældig fordeling af nanopartikler på overfladen af en metalfilm. De fælles træk ved Anderson lokalisering og båndgabsrelaterede fænomener, så som begrænsning af bølgeudbredelse, ledte os til at undersøge mulighederne for at anvende kanaler og kaviteter i strukturer af tilfældigt fordelte nanopartikler til samme formål som plasmon båndgabsstrukturerne beskrevet ovenfor [12]. Ideen med at benytte plasmoner (kvasi-todimensionale bølger) er især tiltrækkende da stærk lokalisering i to dimensioner optræder for alle grader af uorden. Da plasmon lokaliseringen ikke er direkte styret af strukturens geometriske karakteristik kunne man foreslå, at den kan opnås i et bredere bølgelængdeområde end for båndgabseffekten. Endvidere fremmer manglen på symmetri i tilfældige strukturer tilpasning af modes i kanaler med forskellige orienteringer og mindsker dermed også tab ved bøjninger.

De første demonstrationer af guiding og bøjning af bølger baseret på lokaliseringseffekter for plasmoner blev udført i bølgelængdeområdet 700–800 nm ved hjælp af en prøve med 70 nm høje guld bump (men en tæthed på $75 \mu\text{m}^{-2}$) placeret tilfældigt på

en 55 nm tyk guld film. I denne struktur var der lavet $2 \mu\text{m}$ brede retlinjede og bøjede (10° og 20° bøjninger med en radius på $15 \mu\text{m}$) kanaler uden spredere [13]. I bølgelængdeområdet 713–795 nm observeredes stærk plasmon-dæmpning med lokaliseringslængde varierende fra 2,2 til $6 \mu\text{m}$ samt veldefineret guiding langs kanalerne med en intensitetsprofil med FWHM på $1,7 \mu\text{m}$ (se figur 6). Det udgør en



Figur 6. Demonstration af plasmon guiding langs retlinjede og bøjede kanaler i strukturer med tilfældigt fordelte spredere baseret på stærk plasmon lokalisering. (a) Scanning electron mikroskop billede af en typisk kanal i et medium med tilfældigt fordelte spredere bestående af 100 nm brede og 70 nm høje guld partikler på en 55 nm tyk guld film. Pseudofarveskala (b) topografisk og (c,d) optisk nærfeltsbilleder ($30 \times 30 \mu\text{m}^2$) optaget med en bølgelængde på (c) 713 nm og (d) 750 nm for $2 \mu\text{m}$ brede kanaler som vist i (b).

signifikant forbedring af karakteristikkene for plasmon-guiding sammenlignet med det, der er opnået med båndgabsbaserede strukturer [10]. Endelig fandt vi, ved at sammenligne retlinjede og bøjede kanaler, et relativt lavt bøjningstab ($< 1 \text{ dB}$) i bølgelængdeområdet 735–795 nm, hvilket bekræfter at guiding af plasmoner er relateret til multipel spredning i overfladens plan og dermed lokalisering af plasmonerne. Vi forventer at lokaliseringslængden kan reduceres yderligere ved at øge spredningstværsnittet af de individuelle spredere og/eller deres tæthed. Derved opnås en markant forbedring af de observerede effekter i komponenter som bøjninger, splittere, kaviteter mm.. Det skal bemærkes, at refleksion af lys fra tilfældigt fordelte spredere er et kompliceret fænomen, som indeholder diffus refleksion og kohærent tilbagespredning. Derfor kan bølgeledning i kanaler i disse medier udvise ikke trivielle dispersions-karakteristikker. Det kan føre til en række nye interessante effekter forbundet med guiding af elektromagnetiske bølger, som også kan lede til grundlæggende nye anvendelser.

Arbejdet med tynde film foregår i tæt samarbejde

med Per Morgen fra SDU, Odense. Arbejdet med nanoplasmon kredse udføres i tæt samarbejde med et antal Europæiske universiteter under et Network of Excellence i 6. rammeprogram med titlen "PLASMO-NANO-DEVICES"

Referencer:

- [1] K. H. Bennemann (red.) (1998) "Nonlinear Optics in Metals", Clarendon Press, Oxford.
- [2] D. Courjon (2003) "Near-Field Microscopy and Near-Field Optics", Imperial College Press, London.
- [3] T.-C. Chiang (2000) *Surface Science Reports*, bind 39, side 181.
- [4] K. Pedersen, T. B. Kristensen, T. G. Pedersen, T. Jensen, P. Morgen, Z. Li og S. V. Hoffman (2002) *Phys. Rev. B*, bind 66, side 153406.
- [5] T. G. Pedersen, K. Pedersen og T. B. Kristensen (2000) *Phys. Rev. B*, bind 61, side 10255.
- [6] K. Pedersen, T. B. Kristensen, T. G. Pedersen, T. Jensen, P. Morgen, Z. Li og S. V. Hoffman (2003) *Surf. Sci.*, bind 523, side 21.
- [7] A. Kirilyuk, Th. Rasing, R. Megy og P. Beauvillain (1996) *Phys. Rev. Lett.*, bind 77, side 4602.
- [8] H. Raether (1988) "Surface Plasmons", Springer-Verlag, Berlin.
- [9] S. I. Bozhevolnyi og F. A. Pudonin (1997) *Phys. Rev. Lett.*, bind 78, side 2823.
- [10] S. I. Bozhevolnyi, J. Erland, K. Leosson, P. M. W. Skovgaard og J. M. Hvam (2001) *Phys. Rev. Lett.*, bind 86, side 3008.
- [11] C. M. Soukoulis (red.) (2001) "Photonic Crystal and Light Localization in the 21st Century", Kluwer, Dordrecht.
- [12] S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov og K. Leosson (2002) *Phys. Rev. Lett.*, bind 89, side 186801.

- [13] S. I. Bozhevolnyi, J. Beermann og V. Coello (2003) *Phys. Rev. Lett.*, bind 90, side 197403.



Kjeld Pedersen er institutleder ved Institut for Fysik og Nanoteknologi på Aalborg Universitet. Hans forskning har hovedvægt på lineære og ulineære optiske egenskaber af materialer og nanostrukturer, herunder specielt tynde metalliske og isolerende film på halvleder overflader. Han er endvidere en del af iNANO's ledelse.



Sergey I. Bozhevolnyi er professor ved Institut for Fysik og Nanoteknologi på Aalborg Universitet. Hans forskning har hovedvægt på nærfeltsoptik samt lineære og ulineære optiske egenskaber af nanostrukturer, herunder strukturer til fotonik, bl.a. baseret på overflade plasmoner. Han er medstifter af Micro Managed Photons (MMP) A/S, som har plasmon-baserede kredse som teknologisk platform.



Thomas Garm Pedersen er lektor ved Institut for Fysik og Nanoteknologi på Aalborg Universitet. Hans forskning fokuserer på modellering af lineære og ulineære optiske egenskaber af materialer og nanostrukturer. I samarbejde med Forskningscenter Risø arbejder han desuden på udvikling og beskrivelse af lyskilder baseret på organiske halvledere.

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

SNU og UNF fejrer 240 års fødselsdag

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) har i år 180 års jubilæum og Ungdommens Naturvidenskabelige Foreninger (UNF) har 60 års jubilæum – så i alt er det en 240 års fødselsdag.

Dette har vi valgt at fejre med et fælles jubilæumsarrangement *lørdag den 14. august 2004*, på Experimentarium, Tuborg Havnevej 7, 2900 Hellerup, hvor vi gerne vil invitere gamle bestyrelsesmedlemmer, nuværende og tidligere medlemmer, sponsorer, samarbejdspartnere og venner af foreningen m.fl.

Før selve jubilæumsarrangementet afholdes der Ungdomsmesterskab i NaturvidenskabsFormidling. I konkurrencen deltager flere af de showhold, der findes rundt om i landet med tilknytning til universiteterne. Holdene har med deres stand-up-kemi/fysik-shows i flere år turneret på skoler og gymnasier og her på en alternativ måde reklameret for naturvidenskaben. Arrangementet er åbent for alle, så hvis man ønsker at deltage, er man velkommen til møde op på Lille Scene.

Se mere på www.unf.dk/jubilaum.

Det egentlige jubilæumsarrangement med jubilæumstaler, overrækkelse af H. C. Ørsted medaljen i bronze og uddeling af en førstepræmie i Ungdomsmesterskabet i NaturvidenskabsFormidling starter kl. 15.00 på Store Scene og efterfølges af en reception kl. ca. 16.30 til 17.30 i Selskabslokale 2.

UNF og SNU håber det bliver en festlig dag med et stort fremmøde. Såfremt det er muligt, vil vi af hensyn til det praktiske arrangement gerne have tilmelding på jubilaum@unf.dk.

Efterårets program

Efterårets program har temaet "Hvor danskere er brudt igennem" og forventes at indeholde en række foredrag om store gennembrud lavet af danske forskere – Brahe, Steno, Rømer og Bohr.

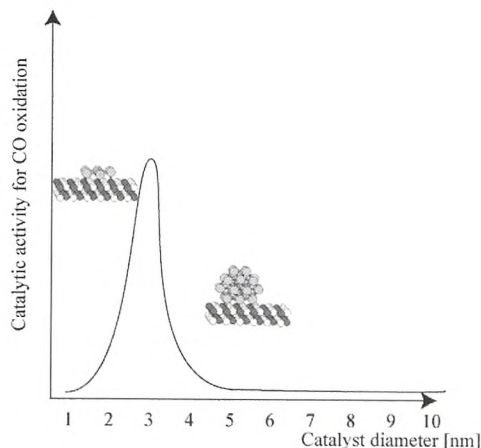
Det detaljerede program vil være tilgængeligt på SNU's nye flotte hjemmeside, naturvidenskab.net, som vil blive lanceret lige før jubilæet.

Funktionelle nanoklynger: nanoreaktivitet og nanoluminiscens

F. Besenbacher, A. Nylandsted Larsen, B. Bech Nielsen og I. Stensgaard, Interdisciplinært Nanoscience Center (iNANO) samt Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

For at styrke og koordinere uddannelse, forskning og erhvervsrettede aktiviteter inden for nanoscience og nanoteknologi oprettedes Interdisciplinært Nanoscience Center (iNANO) ved Aarhus Universitet (AU) (www.inano.dk) den 1. januar 2002. Centeret blev etableret som et samarbejde mellem fagligt stærke forskningsgrupper ved AU med komplementære nano-relevante kompetencer inden for fagområderne fysik, kemi, molekylærbiologi og biologi. Endvidere er flere forskningsgrupper fra Det Sundhedsvidenskabelige Fakultet associeret med centret. Hvad angår uddannelse fik vi Videnskabsministeriets tilladelse til pr. 1. september 2002 at udbyde en ny forsknings-baseret bachelor- og kandidatuddannelse i nanoscience og nanoteknologi, hvor de studerende gennem de første tre år opnår grundlæggende tværfaglige kompetencer inden for fysik, kemi, biologi og matematik, samtidig med at nano-relaterede aktiviteter introduceres gennem projektorienteret undervisning. Senere på uddannelsen specialiserer de studerende sig inden for en gren af nanoscience. Endelig er der til iNANO-centeret knyttet en erhvervsrettet forskerskole (www.inanoschool.dk), hvor en lang række ph.d.-stipendier er finansieret gennem den såkaldte trediedelsmodel, hvor 1/3 finansieres af en virksomhed, 1/3 gennem en bevilling fra Forskeruddannelsesrådet og 1/3 af Det Naturvidenskabelige Fakultet, AU.

Vi vil i denne artikel kort omtale to fysikrelaterede forskningsprojekter ved iNANO. Inden for nanoscience er mange aktiviteter rettet mod at syntetisere nano-strukturer med nye funktionelle egenskaber. Der findes i nano-feltet en lang række eksempler på at "small is different", dvs. at nanostrukturerne har specielle elektriske, magnetiske, mekaniske og kemiske egenskaber, og at disse er knyttet til strukturernes små længdeskalaer. For eksempel er konduktansen i en nanometer tyk tråd kvantiseret i enheder af $2e^2/h$, hvilket ikke er tilfældet for en tykkere tråd, hvor konduktansen er proportional med trådens tværsnitsareal. For flerlagsstrukturer med nanometer tynde magnetiske lag kan den elektriske modstand være stærkt magnet-feltafhængig; en effekt der er blevet døbt gigantisk magnetoresistans (GMR). Vi vil nedenfor vise, at Au-nanopartikler er lige så kemisk reaktive som Pt partikler på trods af den kendsgerning, at Au normalt er et ikke-reaktivt (ædelt) metal, og at Ge/Si-nanoklynger udsender intenst lys i modsætning til større prøver af disse materialer.



Figur 1. Illustration af den overraskende katalytiske aktivitet for Au-partikler med størrelser på nogle få nanometer.

Nanokrystallers katalytiske aktivitet

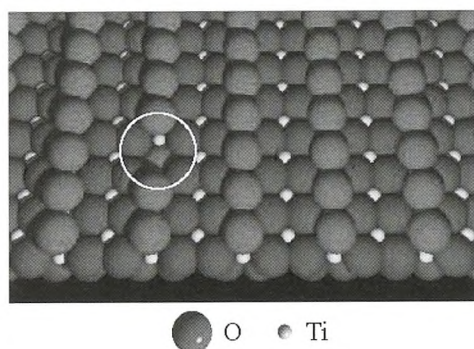
En af de mest spændende opdagelser inden for katalyseforskningen gennem de sidste 20 år har været, at guldpartikler af nogle få nanometers størrelse udviser en bemærkelsesværdig katalytisk aktivitet for kemiske reaktioner, f.eks. CO-oxidation. Guld betragtes normalt som det mindst reaktive af alle metaller og er derfor ikke nogen oplagt kandidat til et katalytisk materiale. Når man ikke desto mindre har observeret, at nanopartikler af guld syntetiseret på forskellige oxider er katalytisk aktive selv ved lave temperaturer, er det klart, at nanokatalyse baseret på guldpartikler bliver genstand for voldsom interesse. Derfor publiceres nu årligt flere hundrede artikler på verdensplan om guldbaseret katalyse. Et af de store teknologiske problemer med de nuværende platinbaserede katalysatorer, som bl.a. bruges i forbindelse med CO-oxidationen i udstødningsgassen fra biler, er at de først bliver katalytisk aktive ved høje temperaturer. Over 70 % af den samlede forurening fra biler med katalysator bliver derfor udsendt i løbet af de første få minutters kørsel, hvor katalysatoren endnu er kold. Et gennembrud i forskningen i Au-nanopartikler vil derfor kunne lede til en enorm formindskelse af udslippet af giftige og miljøskadelige gasser fra biler, da Au-katalysatorer er aktive lige fra det øjeblik, hvor man drejer nøglen og starter bilen.

En af de væsentligste grunde til, at vi endnu ikke kører rundt med guldkatalysatorer i biler, er, at den katalytiske effekt forsvinder i løbet af relativt kort tid, fordi

Au-partiklerne klumper sig sammen under processen (såkaldt *sintring*). Herved forsvinder nano-partiklernes særlige effekt og gullet bliver kemisk inaktivt (ædelt), som vi er vant til. En stor udfordring er derfor at forstå, hvad der forårsager Au-nanopartiklernes katalytiske aktivitet, men også hvordan de bindes til oxidoverfladerne og hvad der er skyld i, at de sintrer i løbet af kort tid.

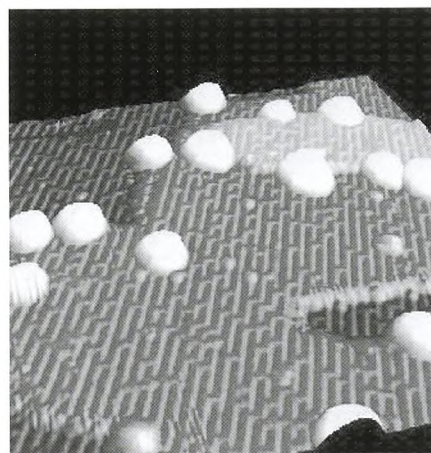
Hvorfor er guldpartikler i nano-størrelse på en oxid særdeles aktive, mens udstrakte guldoverflader er fuldstændigt inaktive i forbindelse med f.eks. CO-oxidation? Dette spørgsmål har man endnu ikke noget sikkert svar på, men mange mulige effekter bliver undersøgt. Der er almindelig enighed om, at CO adsorberer på Au-nanopartiklerne, og at iltmolekylerne adsorberer på oxiden og efterfølgende diffunderer til Au-partiklerne, hvor reaktionen med CO foregår. Et af de store spørgsmål er, hvorledes iltmolekylerne bliver dissocieret til enkelte iltatomer, der efterfølgende hver især kan reagere med CO-molekyler. Energibarrieren for dissociation er ekstremt høj på udstrakte Au-overflader, og der har derfor været fremsat spekulationer om forekomsten af særlige aktive "*dissociation sites*", som kun findes, når guldpartiklerne er nogle få nanometer i størrelse. En anden mulighed kunne være, at det underliggende oxidmateriale deltager mere aktivt i processen, f.eks. via ladningsoverførsel til iltmolekylerne.

Scanning tunnel mikroskopi (STM) er en enestående teknik til at afbilde overfladers statiske og dynamiske egenskaber med atomar opløsning. På Aarhus Universitet har vi brugt denne teknik til at studere, hvorledes Au-partikler bindes til titandioxidoverflader og til at undersøge, hvordan iltmolekyler vekselvirker med oxidoverfladen. Titandioxid er en reducerbar oxid, og ved opvarmning dannes derfor en stor mængde defekter i form af iltvakancer (manglende iltatomer) i overfladen. Disse iltvakancer har vist sig at være af overordentlig stor vigtighed både for vekselvirkningen med guldpartiklerne og i særdeleshed for iltmolekylernes egenskaber på oxidoverfladen. Figur 2 viser en kuglemodel af den studerede TiO_2 -overflade med en iltvakance (markeret med en hvid cirkel).



Figur 2. Kuglemodel af den studerede TiO_2 -overflade. De mørke kugler svarer til iltatomer og de lyse kugler er titaniumatomer. Den hvide cirkel markerer en iltvakance, og sådanne defekter har vist sig at være af stor betydning for overfladekemi på TiO_2 .

Vore STM-studier har vist, at det er iltvakancerne, der fungerer som bindeled mellem guldpartiklerne og oxidoverfladen. Når guldpartiklerne pådampes ses et tydeligt fald i antallet af vakancer, da mange af vakancerne er samlet under gullet for at stabilisere partiklerne på oxidoverfladen. En detaljeret analyse viser, at hver enkelt iltvakance kan binde op til ca. 3 Au-atomer, og der eksisterer derfor en kritisk Au-partikelstørrelse for et givet antal vakancer [1]. Ud fra disse studier virker det derfor sandsynligt, at en del af forklaringen på den uønskede Au-sintring skal findes i vekselvirkningen med iltvakancerne i oxidoverfladen under de katalytiske reaktionsbetingelser. Figur 3 viser et typisk STM-billede af TiO_2 -overfladen med de pådampede Au-nanopartikler. Oxidoverfladen ses at bestå af atomrækker med spredte punktdefekter. Rækkerne er titanatomer, mens punktdefekterne er iltvakancer.



Figur 3. STM-billede af guldpartikler på TiO_2 -overfladen.

Udover at være substrat for dyrkningen af Au-nanopartikler er det også vigtigt, at oxidmateriale kan adsorbere iltmolekyler og således levere den nødvendige ilt til katalytiske reaktioner på Au-partiklerne. En vigtig proces i denne forbindelse er ilt-diffusion, hvorved ilt kan transporteres henover overfladen. Diffusionsprocesser på overflader er normalt forbundet med vekselvirkninger mellem de diffunderende molekyler og gittervibrationer i overfladen (såkaldte fononer – se nedenstående afsnit), men alle hidtidige diffusionsstudier er foregået på metaloverflader og der findes stort set ingen fundamental viden om diffusionsprocesser på oxidoverflader. Ved at følge de enkelte molekylers bevægelse i såkaldte STM-film kunne vi analysere diffusionsprocessen og sammenligne med resultater fra metaloverflader. Meget overraskende viste det sig, at en typisk fonon-induceret diffusionsmodel ville være en yderst dårlig beskrivelse af processerne på oxidoverfladen, og en nærmere analyse af dataene viste, at tilstedeværelsen af iltvakancerne på overfladen spiller en vigtig rolle for diffusionen af adsorberet ilt. Titandioxid er en halvleder, og ilt-

vakancerne introducerer nye elektrontilstande i materialet, som er af stor betydning for oxidoverfladens elektroniske egenskaber. Vore undersøgelser af ilt-diffusionen på TiO_2 og dennes afhængighed af iltvakancerne viste, at diffusionsprocesserne nærmere er styret af elektronoverførsel fra iltvakancerne til iltmolekylerne end af koblinger til gittervibrationer: Hver gang et iltmolekyle udveksler en elektron med TiO_2 -krystallen foretager molekylet således et hop på overfladen [2].

Resultaterne bidrager til forståelsen af oxidoverfladens rolle for *nano*-guldts katalytiske egenskaber, men åbner også for nye muligheder i det fremtidige design af oxidoverflader med specifikke, forbedrede egenskaber til bestemte reaktioner. I øjeblikket studerer vi Au/TiO_2 -systemet under realistiske reaktionsbetingelser – dvs. høje gastryk – og derudover undersøger vi andre metalpartikler på oxidoverflader, f.eks. Cu/ZnO , for at kunne opstille mere generelle modeller. Sintring er ligeledes et betydeligt problem for Cu -nanopartikler og et af de store spørgsmål, som vi arbejder på, er hvilken effekt høje gastryk og høje temperaturer har på stabiliteten af nano-metalpartikler på oxidoverflader.

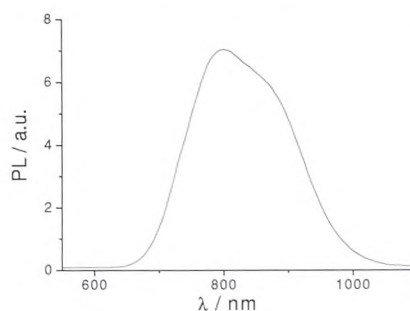
Luminescens fra nanokrystaller

Forekomsten af grundstoffet silicium i jordskallen udgør 28 % af dennes masse og overgås kun af ilt, hvis vægtprocent er omkring 47 %. Det er et af naturens mere vellykkede luner, at netop disse to grundstoffer udgør ryggraden i den teknologiske revolution, som mikroelektronikken har givet anledning til siden den spæde start i slutningen af 1950'erne. Den fundamentale byggesten i de fleste processorer er den såkaldte MOS-struktur, hvor et metallag er deponeret på et lag af siliciumdioxid ovenpå krystallinsk silicium. Ved passende kontaktering og dotering af siliciumsubstratet med fremmedatomer kan der heraf skabes en transistor, der benævnes en MOSFET. Det tynde aktive lag i denne komponent, der kaldes kanalen, ligger i siliciumsubstratet og er nabo til grænsefladen mellem oxiden og substratet.

Hovedårsagen til den voldsomme vækst i computerens ydeevne, som vi har været vidne til gennem de seneste mange år er, at det er lykkedes at reducere størrelsen af MOSFET-transistorerne. De fleste processorer, der produceres, hviler på $0,13\ \mu\text{m}$ teknologi, men den største fabrikant (Intel) begyndte i fjerde kvartal af 2003 at afskibe produkter baseret på 90 nm teknologi, hvor tykkelsen af siliciumdioxidlaget kun er omkring 1,2 nm eller ca. 5 atomare lag. Dermed svarer de kritiske dimensioner til mindre end 1 promille af diameteren af et normalt hår. Vi har vænnet os til betegnelsen mikroelektronik, men som det fremgår, har den siliciumbaserede elektronik allerede udviklet sig til et succesrigt eksempel på nanoteknologi. Fremtiden er begyndt!

Ideelt set ønsker man at kombinere optiske og

mikroelektroniske funktioner på den samme chip. Det er derfor en væsentlig begrænsning, at silicium som det foretrukne materiale til mikroelektronik ikke umiddelbart er velegnet til produktion af lyskilder, som lys-emitterende dioder, lasere, etc. Når en elektron i materialet bringes op i en exciteret tilstand, kan den henfalde til grundtilstanden under lysudsendelse. Der er dog begrænsninger på henfaldsprocessen, idet denne skal ske under bevarelse af systemets energi samt dets krystalimpuls [3]. Den enkelte elektrons bidrag til krystalimpulsen afhænger af tilstanden, som den befinder sig i. I silicium har den laveste exciterede elektrontilstand en krystalimpuls, der er *forskellig* fra grundtilstandens krystalimpuls. Derfor kan henfaldet fra den exciterede tilstand med energien E_c til grundtilstanden med energien E_v ikke forløbe blot ved at udsende én foton med energien $E_{foton} = E_c - E_v$. Der er behov for endnu en "partikel" for at få både energi- og krystalimpulsregnskabet til at balancere. Den ekstra "partikel" benævnes en fonon, og ligheden med betegnelsen "foton" er ikke tilfældig. Ganske som svingninger af elektromagnetiske felter i nogle sammenhænge bedst beskrives som partikler (fotoner) med veldefineret energi og impuls, kan svingninger af atomer i faste stoffer opfattes som fononer med veldefineret energi og krystalimpuls. Lysudsendelsen i silicium kræver dermed, at der samtidigt med en foton enten udsendes eller absorberes en fonon. Denne to-partikelproces er mindre sandsynlig og taber derfor i konkurrencen med andre henfaldsprocesser, der ikke medfører lysudsendelse. I andre halvleder materialer, f.eks. GaAs, har elektronen *samme* krystalimpuls i den exciterede tilstand som i grundtilstanden. Henfaldet til grundtilstanden kan således ske direkte og med stor sandsynlighed via udsendelse af lys i sådanne materialer.



Figur 4. Fotoluminescensspektrum målt ved stuetemperatur på en prøve med silicium-nanokrystaller indlejret i siliciumdioxid. Prøven er stillet til rådighed af F. Priolo, CNR-Cartania.

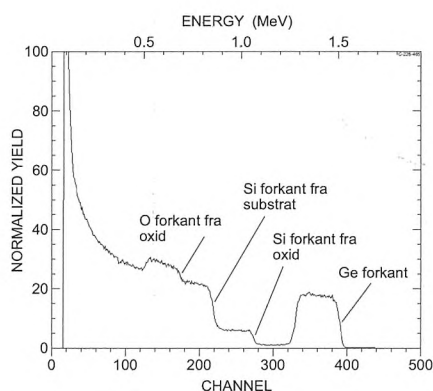
I nanoverdenen er det muligt at overvinde siliciummaterialets optiske begrænsninger. Årsagen bunder i, at positionen og krystalimpulsen af en elektron ikke samtidigt kan fastlægges med vilkårlig nøjagtighed. Dette faktum udtrykkes via ubestemthedsrelationen:

$$\Delta x \Delta p_{kryst} \geq \frac{h}{4\pi}, \quad (1)$$

hvor Δx er ubestemtheden i positionen, Δp_{kryst} er ubestemtheden i krystalimpulsen, og h er Plancks konstant. Δx er fastlagt af siliciumkrystallens størrelse, og Δp_{kryst} øges således i takt med, at størrelsen mindskes. Ved meget små krystalstørrelser (nogle få nanometre) bliver Δp_{kryst} så stor, at elektronerne med betydelig sandsynlighed har samme krystalimpuls i den exciterede tilstand som i grundtilstanden. Som konsekvens bliver sandsynligheden for lysudsendelse ligeledes betydelig. I figur 4 er vist et eksempel på effektiv lysudsendelse ved stuetemperatur (fotoluminescens) [4] fra en prøve, der indeholder nanokrystaller af silicium indlejret i siliciumdioxid dyrket via CVD (chemical vapor deposition). Af figuren ses det, at luminescensspektret er bredt med maksimum ved ca. 800 nm, hvilket indikerer en energiforskel $E_c - E_v \approx 1,55$ eV, der betydeligt overstiger de 1,12 eV i makroskopisk silicium. Dette er ikke i sig selv foruroligende, idet energiforskellen mellem den laveste exciterede tilstand og grundtilstanden forventes at blive øget i takt med, at krystalstørrelsen mindskes.

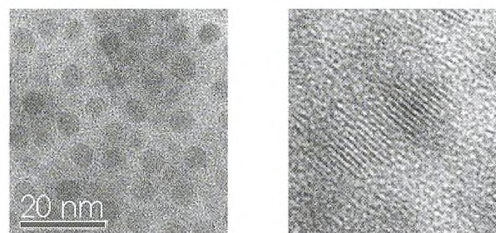
Silicium-nanokrystaller forventes at give en meget mere effektiv lysudsendelse ved kortere bølgelængder end makroskopiske krystaller.

I Århus-gruppen har vi i første omgang valgt at fokusere på nanokrystaller af germanium indlejret i siliciumdioxid. Teoretiske modelberegninger [5] indikerer, at oscillatorstyrkerne, der er et mål for styrken af de optiske overgange, er langt stærkere for de laveste exciterede elektrontilstande i nanokrystallinsk germanium sammenlignet med silicium. Germanium og silicium tilhører som bekendt samme hovedgruppe i det periodiske system, og introduktionen af germanium er generelt forenelig med den eksisterende siliciumteknologi. Der er således håb om, at vi kan forøge lysudsendelsen uden samtidig at opgive det langsigtede mål med integration på én chip.



Figur 5. Rutherford-tilbagespredningsspektrum, hvor antal tællinger (Yield) vises som funktion af tilbagespredningsenergien (Channel).

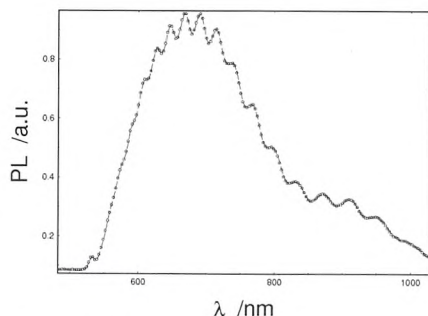
Strategien er ved en højtemperaturproces at udfælde nanokrystaller fra en overmættet opløsning af germanium i et siliciumdioxidlag deponeret ovenpå et silicium substrat. Den atomare koncentration af germanium er blevet varieret fra 2 til 20 %, og procestemperaturerne mellem 400 og 1100°C. Det er helt afgørende at kunne arbejde med velkarakteriserede prøver, og den atomare sammensætning af prøverne undersøges derfor bl.a. med Rutherford spredning. I figur 5 vises et tilbagespredningsspektrum målt på en prøve før højtemperaturprocessen. Ved hjælp af spektret kan vi bestemme koncentrationen af germanium som funktion af dybden, den nøjagtige støkiometri af oxiden samt dennes tykkelse. Vi kan ligeledes afgøre, om germaniumatomerne under opvarmningen diffunderer ud af prøven eller ophobes på grænsefladen mellem oxidet og substratet. Transmissionselektronmikroskopi (TEM) kan anvendes til at observere, hvorvidt der dannes nanokrystaller i vore prøver. I figur 6a vises et TEM-billede, der er optaget efter opvarmning til 800°C i 30 min på en prøve med 18 at. % germanium. Som det fremgår, dannes små nanostrukturer med relativt veldefineret størrelse på ca. 5 nm. At disse strukturer rent faktisk består af nanokrystallinsk germanium understøttes kraftigt af figur 6b, der viser et højt opløseligt TEM-billede på samme prøve. Krystalplanerne i de to nanokrystaller, der kan anes på billedet, er tydelige, og afstanden mellem planerne er $3,2 \pm 0,1$ Å, hvilket er konsistent med (111) planerne i krystallinsk germanium. For nogle prøver er yderligere bekræftelse opnået ved hjælp af røntgendiffraktion.



Figur 6. a) TEM-måling efter opvarmning til 800°C i 30 min. b) Højt opløseligt TEM-måling på samme prøve.

Det er lykkedes at observere kraftig fotoluminescens i flere af vore prøver, som vist i figur 7. Den kraftige oscillation i luminescensspektret skyldes et interferensfænomen, der kan anvendes til at bestemme tykkelsen af det deponerede oxidlag. Intensiteten af lyset, og til dels formen af spektret, er afhængig af, hvorledes prøven præpareres og af opvarmningstemperaturen. I øjeblikket arbejder vi på at klarlægge de afgørende fremstillingsparametre med henblik på at optimere lysudsendelsen. Som det fremgår af figuren, er det observerede spektrum bredt, og det er i kvalitativ overensstemmelse med det, der tidligere er blevet rapporteret af Takeoka m.fl. [6] På basis af den observerede variation af bølgelængden ved maksimal intensitet når nanokrystallernes størrelse ændres,

konkluderede disse forfattere, at lysudsendelsen stammer direkte fra henfaldet af exciterede elektroner til grundtilstanden i nanokrystallerne. Dette synspunkt er senere blevet afvist af Niquet m.fl. [7], der forklarer lysudsendelsen ved elektronovergange, der involverer tilstande på grænsefladerne mellem nanokrystallerne og den omgivende oxid. En tredje mulighed er, at lysudsendelsen stammer fra overgange associeret med defekter i selve oxidlaget.



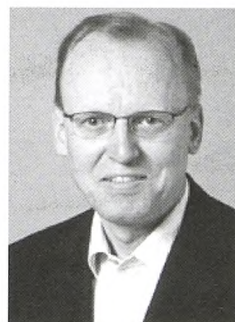
Figur 7. Fotoluminescensspektrum optaget ved stuetemperatur på en prøve med 13 at. % germanium i SiO₂. Oxidlaget tykkelse er ca. 7 μm, og prøven er opvarmet til 800°C.

Når optimeringen af lysudsendelsen er tilendebragt, vil vi søge at identificere årsagen til den observerede luminescens. Vi har til vor rådighed en hel række analytiske teknikker, der udgør et slagkraftigt og værdifuldt værktøj i den sammenhæng. Desuden vil vi undersøge, hvorledes luminescensen ændres, når grænselaget mellem oxiden og nanokrystallerne modificeres med brint og andre kemisk-aktive elementer. Endelig er det på relativt kort sigt målet at skabe en komponent, hvor lysemissionen induceres elektrisk i stedet for optisk.

Referencer:

- [1] Erik Wahlström m.fl. (2003) *Physical Review Letters*, bind **90**, side 02611.
- [2] Rénaud Schaub m.fl. (2004) *Science*, bind **299**, side 377, og Erik Wahlström m.fl. (2004) *Science*, bind **303**, side 511.
- [3] Situationen er analog til et isoleret system af partikler, hvor både totalenergien og den totale impuls er bevarede.
- [4] I en typisk fotoluminescensmåling belyses prøven med monokromatisk lys, og spektret af det lys (luminescensen), som prøven udstråler, måles f.eks. ved hjælp af en monokromator.
- [5] H.-Ch. Weissker, J. Furthmüller og F. Bechstedt (2002) *Phys. Rev. B*, bind **65**, side 155328.
- [6] S. Takeoka, M. Fujii, S. Hayashi og K. Yamamoto (1988) *Phys. Rev. B*, bind **58**, side 7921.

- [7] Y. M. Niquet, G. Allan, C. Delerue og M. Lannoo (2000) *Appl. Phys. Lett.*, bind **77**, side 1182.



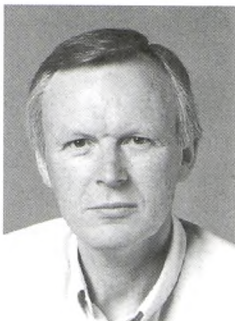
Flemming Besenbacher er professor, dr.scient. ved Institut for Fysik og Astronomi samt direktør for Interdisciplinært Nanoscience Center, Aarhus Universitet.



Brian Bech Nielsen er lektor, lic.scient. ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Han har i en årrække beskæftiget sig med eksperimentel halvlederfysik.



Arne Nylandsted Larsen er lektor, dr.scient. ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Han har i en årrække beskæftiget sig med defekter i halvledere.



Ivan Stensgaard er professor i eksperimentel overfladefysik ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Han er desuden institutleder samme sted.

Har du huller i din KVANT samling?

Kvant har gennem årene akkumuleret et omfattende lager af de tidligere udgaver, og da efterspørgslen efter de lidt ældre numre er meget beskednen, har vi besluttet at reducere lageret. I en begrænset periode sælger vi derfor de tidligere udgaver til kun 5 kr. pr. stk + porto.

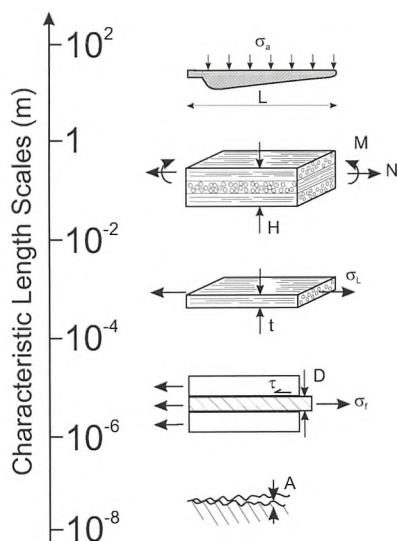
Bestillinger modtages kun pr. e-mail på kvant@kvant.dk eller pr. brev til Kvant, Ørsted Laboratoriet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø. Bestillingerne ekspederes i den rækkefølge, de modtages, og der tages forbehold for udsolgte numre. For tiden er alle tidligere numre på lager, undtagen nr. 1 (2003) og nr. 2 (2000). Betaling sker pr. girokort, som fremsendes sammen med bladene.

Mekanik på nanoskala: Forbedring af fiberkompositters egenskaber

Bent F. Sørensen og Stefanie Feih, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.

Hvad er fiberkompositter?

Fiber-forstærket plast, som består af lange orienterede fibre i en grundmasse (matrix), har stor styrke/vægt forhold og anvendes derfor i stigende grad til lette, men stærke konstruktioner, som f.eks. vindmøllevinger, togvogne og skibe. Sådanne materialer kaldes *fiberkompositter* (sammensatte materialer), og kan skræddersys til at have helt specielle mekaniske egenskaber. For eksempel kan man fremstille komponenter som lagdelte strukturer (laminater), der består af lag (lamina) med forskellig fiberorientering. Et laminat kan have vidt forskellige stivheder i forskellige retninger. Et laminats stivhed kan med god nøjagtighed beregnes ud fra stivhederne af et lamina (lag med ensrettede fibre). Denne fremgangsmåde anvendes traditionelt til at give en komponent netop de stivheder, der ønskes.



Figur 1. Relevante længdeskala for fiberkompositter spænder fra nanometer (ruheder på fiberoverflade) til mange meter (længde af store komponenter).

Det er langt sværere at forudsige *styrkeegenskaber* af laminater af fiberkompositter end stivhedsegenskaberne. Det skyldes, at brud i kompositter, i modsætning til f.eks. brud i keramiske og metalliske materialer, ikke sker ved vækst af en enkelt revne, men ved udvikling af en skadeszone, hvori der er adskillige aktive skadesmekanismer. Det gode er, at det gør kompositmaterialer *skadestolerante*. Det betyder, at den allerførste skade (f.eks. brud i en enkelt fiber) ikke fører direkte til brud af komponenten. Bagsiden er, at hvis man vil forstå, hvordan brud udvikles i et komposit-

materialer, må man derfor prøve at finde ud af, hvordan brudmekanismerne udbreder sig alene og sammen på forskellig skala. De første skader udvikles på fiber-niveau og vokser sammen på større og større skala og fører til sidst til brud af komponenten, se figur 1. I det efterfølgende beskrives de vigtigste brudmåder på de forskellige skala.

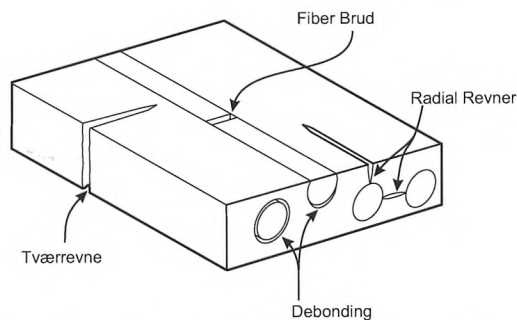
Nogle fakta:

I de fleste fiberkompositter er volumen af fibre omkring 50 volumen % eller højere. Fibrene har typisk en diameter på 10–20 μm . I en 50 meter lang vindmøllevinge er den samlede fiberlængde ca. 20×10^9 m. Det svarer til ca. 50 gange afstanden mellem Jorden og Månen. Det samlede overfladeareal af fibre er ca. 1 km^2 . Det svarer nogenlunde til arealet af 140 fodboldbaner.

Hvis vi forestiller os, at matrixmaterialet til vingen nu smøres ud som et jævnt lag på de 140 fodboldbaner, bliver tykkelsen mindre end 4 μm . Det er tankevækkende, at det i så store komponenter kan lade sig gøre at få fordelt matrixmaterialet mellem fibre.

Brudmekanismer på forskellige skala

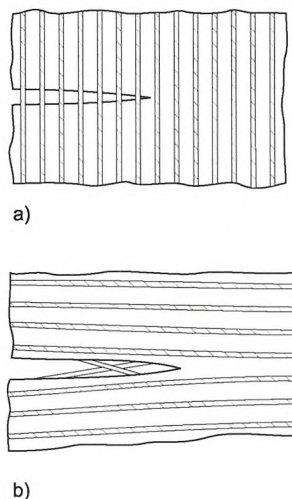
På fiberniveau er det naturligt at beskrive revner i forhold til fiberretningen. De vigtigste brudmekanismer på mikroskala er vist i figur 2. Hvilke brudmekanismer der udvikles, afhænger af belastningsretningen (parallelt eller vinkelret på fiberretningen). Matrixrevner, der udgår radiale fra fiberen kaldes *radiale revner*, og matrixrevner vinkelret på fiberretningen kan kaldes *tværrevne*, mens revner langs fiber/matrix grænsefladen kaldes *debond-revner*. Fibrene kan også bryde.



Figur 2. De vigtigste brudmekanismer på mikroskala.

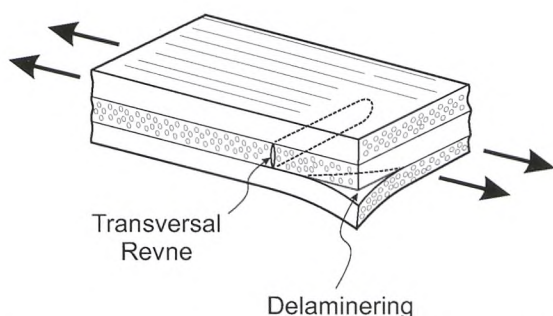
På lamina-skala er de to vigtigste brudmekanismer (se figur 3) revnevækst vinkelret og parallelt med fiberretningen (splitning). I begge tilfælde dannes der

ofte *fiberbrodannelse*, dvs. fibre der hænger fast på begge revneflader og derved hæmmer revneåbningen og -væksten. Hvis der udvikles mange fiberbrud, kan det føre til ustabil brud. Specielt for revner vinkelret på fiberretningen (figur 3a), sker der *glidning* i grænsefladen mellem fiber og matrix.



Figur 3. Brudmekanismer på lamina-skala: Revnevækst vinkelret og parallelt med fiberretningen.

På laminat-skala kan der udvikles yderligere brudmekanismer (figur 4). De vigtigste er *delaminering* og *transversale revner* i lag orienteret vinkelret på trækretningen. Ved delaminering, dvs. revnevækst mellem forskellige lamina, kan der også udvikles fiberbrodannelse. Transversale revner, dvs. revner parallelt med fiberretningen, kan udvikles når der er store trækspændinger vinkelret på fiberretningen.



Figur 4. Brudmekanismer på laminat-skala: Delaminering og tværrevner.

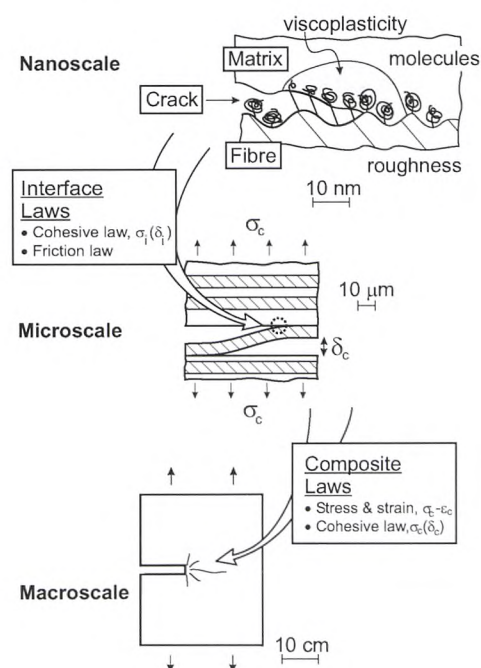
Nanoparametre styrer mikroskala egenskaber

Kigger man nærmere på brudmekanismerne på lamina-skala (figur 3), opdager man at fiberbrodannelsen aktiverer to grundlæggende mekanismer på mikroskala: separation mellem fiber og matrix (debonding) og friktionsstyret glidning i grænseflade mellem fiber og matrix. *I begge tilfælde er det altså grænsefladens egenskaber, der er styrende.* Debonding styres af vedhæftningen mellem fiber og matrix, mens friktionen

delvis styres af overfladeruhederne på fibre. Der følger heraf, at hvis man har metoder til at styre vedhæftningen mellem fibre og matrix samt fibrenes overfladeruhed, så besidder man værktøjet til at skræddersy laminaters styrkeegenskaber. Imidlertid er det netop her, at den grundlæggende viden mangler. Derfor har vi startet et forskningsprojekt, med det formål at etablere en sammenhængende viden om, hvordan manipulation af fibrenes overflader kan føre til markante forskelle i kompositmateriales styrkeegenskaber.

Et nyt STVF-rammeprogram er netop igangsat

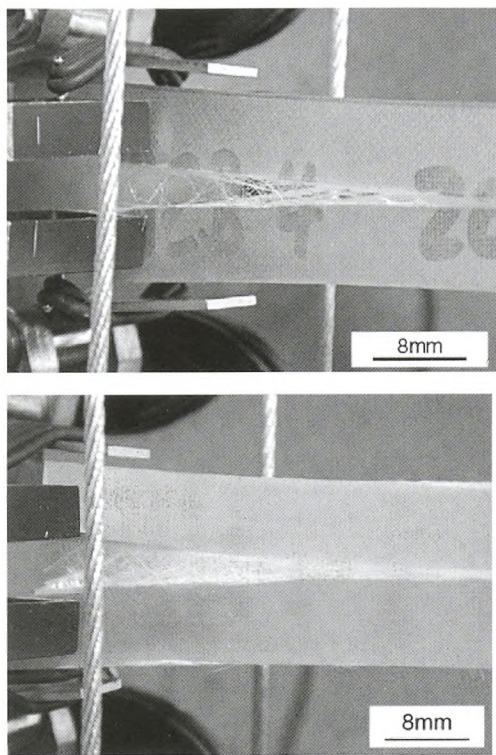
Det nye forskningsprojekt støttes af Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd (STVF) med 11 mill. kr. over 4 år, gennem et såkaldt Rammeprogram, som dækker tre ph.d.-studerende og tre post docs. I projektet vil vi variere vedhæftningen mellem fiber og matrix mellem svag (dvs. næsten ingen vedhæftning) og stærk binding (så debonding ikke finder sted). Friktionen styres gennem overflade topologien, der varieres mellem glat og ru. Ideen er skitseret i figur 5.



Figur 5. Den mekaniske opførsel af grænsefladen, som styres med kemi og overfladeruhed, beskrives gennem grænseflade love, som udgør forbindelsen mellem overflader på mikroskala. Mikromekaniske modeller forudsiger komposit love, som på makroskala repræsenterer brudprocesser i en kontinuumsmodel, hvor kompositmaterialet betragtes som et homogent anisotrop kontinuum.

En stærk vedhæftning kan skabes ved at fastgøre lange molekylekæder på fiberoverfladerne. Under efterfølgende debonding, vil de lange molekyllkæder trækkes ud; derved forøge energioptagelsen. I mekanikkens verden kan denne debonding-proces beskrives ved en såkaldt *kohæsiv lov*, som er sammenhængen mellem brudzonens strækning og den resul-

terende spænding. Overfladeruhederne på fibrene kan styres ved f.eks. litografiske metoder eller ætsning under kontrollerede forhold. I projektet vil vi undersøge to systemer: En glasfiberkomposit og en kulfiber komposit. Disse systemer har stor praktisk interesse for de to deltagende virksomheder, LM Glasfiber A/S og NKT-Flexibles.



Figur 6. Revnevækstforsøg med revne parallel med fiberretningen. Det ses, at laminatet med svagere fiber/matrix vedhæftning (øverst) frembringer mere fiberbrodannelse end standardmaterialet (nederst).

Ideen med at styre de makroskopiske styrkeegenskaber gennem overfladebehandling af fibrene er ikke ny. Kommerciel glasfiber produceres med en overfladebelægning, en såkaldt sizing, som dels tjener det formål at beskytte fibrene under fremstillingen, dels at sikre god vædning mellem fiber og det viskøse matrixmateriale før hærkning, samt efterfølgende at sikre en "passende stærk" binding mellem fiber og matrix. Men på nuværende tidspunkt eksisterer der ikke tilstrækkelig viden til, at denne overfladebehandling kan optimeres.

Vi forventer, at maksimal styrke og maksimal revnevækstmodstand (sejhed) opnås ved forskellige grænsefladeegenskaber. En stærk binding giver ikke nødvendigvis de bedste styrkeegenskaber. Vi har allerede fundet, at en svagere fiber/matrix binding kan give en forøget fiberbrodannelse (se figur 6), som fører til en større revnevækstmodstand. Der er interessant, at man kan gøre et materiale stærkere på makroskopisk niveau ved at gøre det svagere på nano- og mikroniveau.

En anden central problematik er måling og modellering af kohæsive love for fiber/matrix grænse-

fladen. I første omgang testes plane emner ved brudmekaniske forsøg i ESEM (environmental scanning electron microscopy), hvorved brudzoner kan studeres under stor forstørrelse. Finite-element simuleringer anvendes til at identificere de kohæsive love. Andre testmetoder, som f.eks. enkelt-fiber udtrækningsforsøg samt fiberfragmenteringsforsøg, undersøgelser med nano-Raman koblet med SPM (Scanning Probe Microscope) samt evt. røntgen mikrotomografi tænkes også anvendt. Kompositgenskaber forudsiges ved mikromekanisk modellering, f.eks. ved anvendelse af enhedscelle ("unit cell") modeller.

Projektet er tværdisciplinært. Det spænder over polymerkemi og overfladekarakterisering, fremstillingsmetoder, mikromekanik og materialekarakterisering. Forskningsprojektet udføres af et team af forskere fra Afdelingen for Materialeforskning og Polymercenteret på Forskningscenter Risø, fra Aalborg Universitet, Force Technology samt virksomhederne LM Glasfiber A/S og NKT-Flexibles I/S. LM Glasfiber A/S er verdens største vindmøllevegefabrikant og NKT-Flexibles fremstiller rør til off-shore industrien.

Opsummering

Brud i fiberkompositter er kompliceret, men byder på spændende udfordringer for materialeforskningen. Det er fascinerende, at de mekaniske egenskaber af store komponenter afhænger af det mekaniske samspil mellem fibre og matrix, altså af de mekaniske egenskaber af fiber/matrix grænsefladen. Vi regner med inden for de nærmeste år, at kunne opbygge en sammenhængende forståelse af, hvordan kemi og mekanik spiller sammen i kompositmaterialer fra nanoskala til makroskala.

Referencer:

[1] www.risoe.dk/interface



Bent F. Sørensen er seniorforsker ved Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.



Stefanie Feih har været post doc i to år ved Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.

Den molekylære transistor

Per Hedegård, Niels Bohr Institutet f. AFG og Nanosciencecentret, Københavns Universitet.

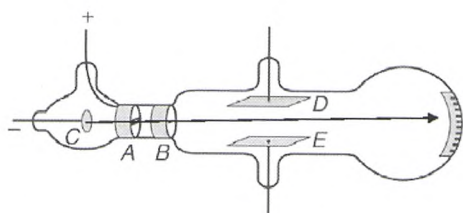
Det drejer sig om kontrol, styring og magt. Den del af videnskaben, Nano, som for tiden nyder stor bevågenhed fra medier, regering og bevilgende myndigheder, beskæftiger sig i høj grad med at manipulere naturen på nanometerskala. Store dele af fysikken og kemien har naturligvis arbejdet med naturen på den skala i over hundrede år, men det har først og fremmest været for at opdage, studere og beskrive, hvordan verden tager sig ud på den skala. Nu er vi blevet så ferme, at vi faktisk kan designe, bygge og udnytte menneskeskabte systemer, der ikke er større end nogle få nanometer – og så kalder vi det Nanovidenskab eller Nanoteknologi. Historien har vist, at sådanne fremskridt har haft enorme økonomiske og sociale konsekvenser.

Et af de bedste eksempler på denne bevægelse fra opdagelse over design og kontrol til økonomi og social forandring er *transistoren*. Vi har for nyligt konstrueret en Molekylær Transistor, der kun er nogle få nanometer stor, og den er seneste led i kongerækken af elektroniske anordninger, der kan styre og kontrollere elektrisk strøm. Jeg skal i denne artikel kort fortælle transistorens interessante historie.

Katodestråler – elektronen

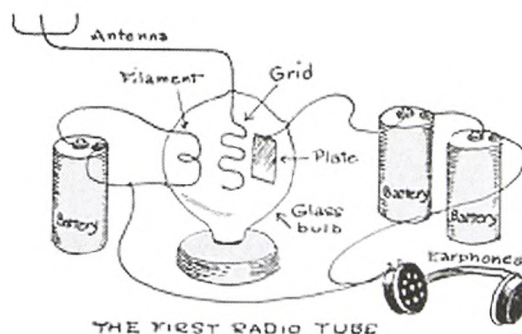
Basalt set er en transistor en elektronisk indretning, der kan styre og kontrollere en elektrisk strøm, der går fra A til B ved hjælp af en tredje elektrode, C.

En forløber herfor er faktisk J. J. Thompsons version af *Katoderøret*.



Figur 1. Thompsons katoderør. Elektriske stråler (elektroner) sendes fra katode (A) til anode (B). Strålen fortsætter igennem røret og styres af to elektroder (D) og (E) og ender på en fosforiserende skærm.

Her sendes elektriske stråler fra katode (med høj negativ spænding) til anode (med høj positiv spænding). Strålerne fortsætter gennem anoden og dens bevægelse kan styres af andre elektroder eller et magnetfelt. Thompsons eksperimenter fra 1897 leder til, at han viser, at strålerne består af negativt ladede partikler. Hovedrolleindehaveren i det 20. århundredes teknologi – *elektronen* – har gjort sit indtog på scenen.



Figur 2. Lee de Forest princip for en radorørs-forstærker

Radorøret

Med Maxwells og Hertz' opdagelse af elektromagnetisk stråling og Marconis og Valdemar Poulsens opfindelsen af radioen blev det nødvendigt at *forstærke* og *ensrette* de noget svage signaler, som transmitteres gennem æteren. Den amerikanske opfinder, Lee de Forest videreudviklede i 1906 katoderøret, så det kunne fungere som en forstærker af et elektrisk signal. I figur 2 er vist, hvordan princippet i den såkaldte *Audion* fungerer. Det elektriske signal, der ønskes forstærket, forbindes til et gitter, der anbringes mellem katoderørets katode og anode. Hvis gitteret gives en negativ spænding, vil elektroner udsendt fra katoden opleve en potentialbarriere på deres vej til anoden. Hvis barrieren er høj, vil kun få elektroner med høj kinetisk energi kunne passere, mens en lav barriere kan tillade mange elektroner at passere.

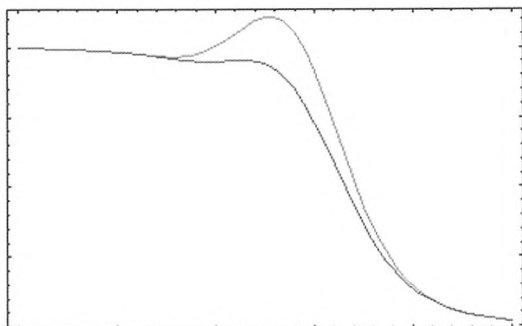
Med stor spændingsforskel mellem katode og anode kan man så med små variationer i spændingen på gitteret få store variationer af strømmen mellem katode og anode og dermed videre rundt i kredsløbet.

I den samme periode blev der desuden opfundet mange andre typer katoderør f.eks. et, der kunne ensrette signaler. Selve konceptet med katoderør dominerede i tekniske anvendelser i første halvdel af det 20. århundrede – ældre mennesker husker, at der indeni deres radio eller fjernsyn var en stor samling af glødende rør. I dag har stort set kun billedrøret til fjernsyn og computere overlevet, og selv de er nu på retur.

Transistoren

Det næste store fremskridt må nu afvente udviklingen af kvantemeknikken og et par verdenskrige. Efter 2. verdenskrig blev der især i USA satset stærkt på videnskab og teknologi. Erfaringerne fra krigen, hvor f.eks. radaren og atombomben blev udviklet i tæt samar-

bejde mellem videnskabfolk og teknikere, inspirerede store firmaer, som f.eks. Bell Telephone, til at investere kraftigt i videnstung teknologi. Man oprettede et forsknings- og udviklingslaboratorium i Murray Hill, New Jersey, og hyrede nogle af de fremmeste fysikere indenfor den nye Faststoffysik, der som bekendt giver en kvantemekanisk forklaring på makroskopiske materialer.

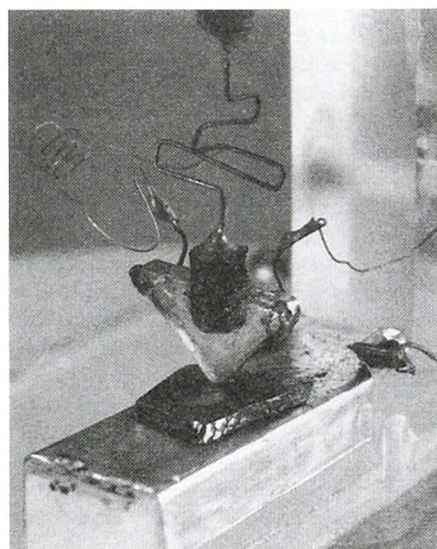


Figur 3. Potentialbarriere, som elektronerne føler i radiorøret. Den øverste kurve angiver forholdsvis høj negativ spænding på gitteret, mens den nederste angiver lav negativ spænding.

John Bardeen, Walther Brattain og William Shockley var tre sådanne fysikere, og de konstruerede den første halvleder-transistor i 1949. For dette arbejde modtog de i 1956 Nobelprisen i fysik (Året efter, i 1957, fandt Bardeen sammen med Cooper og Schrieffer, den korrekte teori for superledning, og han måtte rejse til Stockholm endnu engang, og er den eneste fysiker der indtil dato har modtaget Nobelprisen i fysik to gange). Ifølge kvantemekanikken er en helt ren halvlederkrystal (f.eks. Si) praktisk talt det samme som vacuum. Der findes ingen frit bevægelige ladninger. Ved at introducere sådanne urenhedsatomer (f.eks. Ga eller As), kan man ændre på antallet af ladningsbærere, og disse kan nu styres af elektriske spændinger påtrykt halvlederens forskellige dele. De ideer og begreber Bardeen, Brattain og Shockley benyttede var et mix af den nye kvantemekanik og den elektricitetslære man kendte fra katoderørerne. I figur 4 ses den allerførste halvleder-transistor, som Bardeen og Brattain flikkede sammen efter en ide af Shockley. Der er tydeligvis stor forskel mellem de checkede chips vi ser i dag og denne første transistor, men ideen og princippet har de til fælles.

Al elektronik var i starten af 60'erne anbragt på såkaldte printplader, hvorpå var lagt (eller rettere: ikke fjernet med acetone) kobberbaner, som forbandt enkeltkomponenter (modstande, kondensatorer, spoler, ensrettere og transistorer), der var loddet på. I starten af 60'erne fik Jack Kilby, fysiker ved Texas Instruments den epokegørende ide, at anbringe hele kredsløbet på en enkelt siliciumkrystal. Selve komponenterne, inklusive ledende baner, der forbinder dem, blev lagvis pådampet krystallen i overensstemmelse med et antal masker. Dette koncept viste sig at være så kraftfuldt, at det startede en eksponentiel udvikling, som vi stadig er midt i. Den har ikke set sin lige siden den såkaldte *infla-*

tionsperiode i det tidlige univers. Her udvidede universets størrelse sig eksponentielt i en kort, eksplosiv periode. Udviklingen er karakteriseret ved den berømte Moores lov. Ifølge denne vil antallet af transistorer på et givet areal fordobles ca. hvert andet år. I 1970 var der ca. et par tusinde transistorer på Intels berømte 8008 chip, mens der nu er op mod 100 millioner på den seneste Pentium chip. Den enkelte transistor fylder så mindre og mindre, og vi kan spørge Moore om, hvornår en enkelt transistor i en operationel chip fylder f.eks. 50 kvadratananometer. Vi er gået fra kvadrat-millimeter til kvadrat- μ i løbet af ca. 35 år, så da er der ligeså langt fra kvadrat- μ til kvadrat-nanometer, så vil der altså gå ca. 30 år til vi når denne ultimative grænse. Det er jo ganske lang tid, men når man betænker, at der gik ca. 20 år fra, at den første elektroniske transistor blev konstrueret til den i stor stil blev anvendt i computer-chips, så er det ikke for tidligt, at eksperimentere med enkelt-molekyl-transistorer allerede nu.



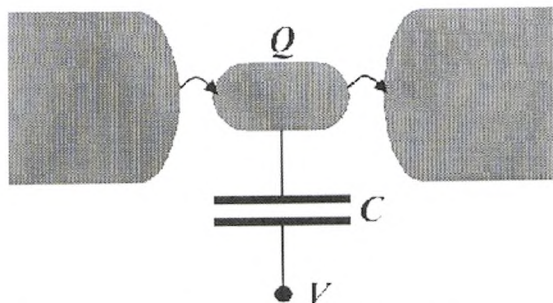
Figur 4. Brattain og Bardeens første transistor. Et vidunderligt eksempel på, at en ide kan være meget stærkere end sin første inkarnation.

Denne artikels klimax er netop konstruktionen af en sådan transistor, som den blev præsenteret i Nature sidste år af den skandinaviske gruppe, hvoraf Nanoscience-centret ved Københavns Universitet er en del. Inden da er det dog nødvendigt, at beskrive en afgørende udvikling af transistorbegrebet, som blev gjort for knapt 20 år siden:

Enkelt-elektron transistoren

Indtil for 20 år siden var det helt almindeligt og naturligt at opfatte strømmen i ethvert elektrisk kredsløb som bestående af en sammenhængende væske. Det faktum, at vi siden Thompson har vidst, at strømmen er bevægelse af ganske små ladede elementarpartikler – elektroner – har ikke spillet nogen væsentlig rolle. I 1985 konstruerede Likharev og Zorin en såkaldt *Single Electron Transistor* (SET), hvis hele virkemåde hviler

på tilstedeværelsen af enkelte elektroner eller, om man vil, ladningskvanter. I figur 5 ses en skitse af princippet i en SET.



Figur 5. Skematisk Enkelt-elektron transistor. Elektroner skal bevæge sig fra venstre mod højre: Først hoppe fra source-elektrode til øen i midten og videre til drain-elektroden. Når elektronen opholder sig på øen øges den elektrostatiske energi. Denne energi afhænger af spændingen på en gate-elektrode (nederst) som er kapacitivt koblet til øen (angivet med C)

Når strømmen løber, er det meningen at elektroner skal bevæge sig fra *kilde* til *dræn* – fra *source* til *drain*. Undervejs skal elektronerne dog passere en lille ø, hvis potentiale er kontrolleret af en såkaldt *gate-elektrode*. Hvis der ikke er noget potentiale på gaten, vil den lille ø foretrække at være elektrisk neutral. Skulle en elektron nu forville sig fra source-elektroden til øen (hvilket kun kan lade sig gøre ved hjælp af tunnel-effekten), så bliver øen opladet, og det koster energi. Faktisk kan man opfatte øen som den ene elektrode i en kondensator, og man kan vurdere størrelsen af opladningsenergien ved at bruge den kendte formel.

$$E_C = \frac{e^2}{2C},$$

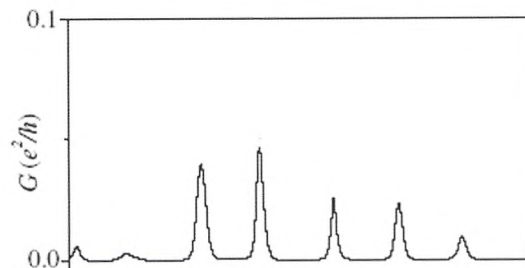
hvor C er kapacitansen af kondensatoren. Denne har en værdi, der kan vurderes med udtrykket

$$C \approx \epsilon_0 a,$$

hvor ϵ_0 er permittiviteten af det omkringliggende materiale, og a er en karakteristisk længde. Hvis a f.eks. er 1μ , så vil $E_C \approx 0.01$ eV, og hvis $a = 1$ nm, så er $E_C \approx 10$ eV, dvs. jo mindre en ø, jo større er opladningsenergien. Hvis E_C er større end en typisk termisk energi – $k_B T \approx 25$ meV for $T = 300$ K (stuetemperatur) – så kan man se bort fra opladningsenergien, og elektronerne kan uden synderligt besvær bevæge sig gennem transistoren. Hvis E_C derimod er meget større end den termiske energi, hvilket den er, hvis øen er nogle få hundrede nanometer stor, så har elektronen simpelthen ikke nok energi med sig til at lade øen op, og al strøm gennem transistoren stopper. Fænomenet kaldes *Coulomb-blokaden*.

Coulomb-blokaden kan imidlertid ophæves, hvis man ved at sætte spænding på gate-elektroden ændrer øens elektriske potential. Ved en ganske bestemt

spænding vil den samlede elektrostatiske energi af systemet med og uden en elektron på øen være præcis den samme, og det er nu muligt for elektronerne en for en at passere transistoren. Hvis man nu øger spændingen yderligere, vil den første elektron, der hopper over på øen forblive der, og hele historien gentager sig: Det er nu ikke muligt for den næste elektron at tage turen, og transistoren blokerer indtil gatespændingen opnår en så tilpas høj værdi, at der igen lykkes op. Hvis man således plottes stømmen gennem transistoren som funktion af gate-spændingen fås en kurve som i figur 6.



Figur 6. Coulomb-blokade. Ledningsevnen af en Enkelt-elektron transistor som funktion af gate-spændingen. Ved en række af magiske spændinger er den elektrostatiske energi af en ø med n elektroner den samme som en ø med $n + 1$ elektroner. Kun ved disse spændinger kan der passere strøm igennem transistoren. Data i figuren er taget af Jesper Nygård og konsorter, og øen er i dette tilfælde en lille stump af et kulstof-nanrør.

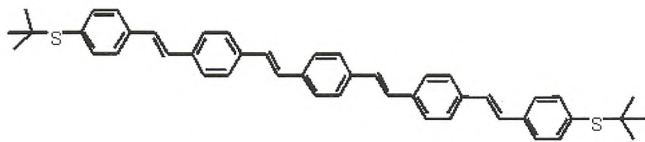
Det er klart at en sådan konstruktion udviser transistor-virkning, idet en meget lille ændring af gate-spændingen kan forårsage en endog meget stor ændringen i strømmen, og en dertil hørende forstærknings-effekt. Siden midten af 80'erne er der foregået en voldsom udvikling af SET-konceptet. Man har eksperimenteret med flere øer, med bevægelige øer, etc. og der er opdaget en række nye fysiske effekter, som utvivlsomt vil kunne finde interessante anvendelser i fremtidige elektroniske komponenter.

Den molekylære transistor

De oprindelige Enkelt-elektron transistorer havde en central ø, som var mikrometer stor, hvorfor det var nødvendigt at køle systemet ned til nogle få Kelvin for at få transistorvirkningen. I de allersæneste år har flere grupper eksperimenteret med at konstruere meget små transistorer, hvor den centrale ø er en lille molekyle, der kun er nogle få nanometer stort. Det er ikke så helt ligetil, idet man skal være i stand til lave tre metalelektroder, som er anbragt få nanometer fra hinanden uden at kortslutte. Stor var da også sensationen da en fysiker, Jan Hendrik Schön, fra de legendariske Bell Laboratorier, som stod bag den første elektroniske transistor, i 2001 kunne rapportere, at han havde set transistorvirkning i en komponent bygget på kun et enkelt molekyle. Schön var i det hele taget fantastisk produktiv med flere Nobelpris-klasse opdagelser i disse år. F.eks. kunne han producere superledning ved

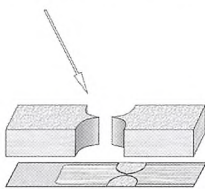
meget høje temperaturer i en materiale lavet af kulstof-fodbolde (C_{60}) og indbygget mellem elektroderne i en felt-effekttransistor! Desværre har det senere vist sig, at alle disse "opdagelser" var fup og svindel – data var simpelthen produceret af Schön selv i hans computer.

Der skulle gå et par år før det faktisk lykkedes for nogle få grupper, henunder den dansk-svenske, at lave en egentlig Enkelt-elektron transistor, med en central ø bestående af et enkelt ikke alt for stort molekyle.



Figur 7. OPV5-molekylet. Det består af 5 benzenringe koblet sammen af to kulstofatomer og med en svovlgruppe i hver ende.

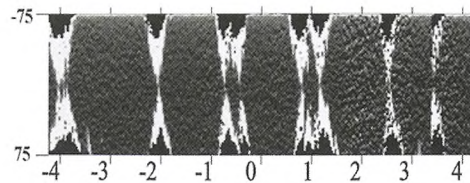
Lad mig her vise, hvordan den skandinaviske molekylære transistor fungerer. Selve molekylet er et såkaldt OPV5 molekyle (se figur 7). Det er et organisk molekyle, der består af 5 benzenringe hver forbundet med 2 kulstofatomer (+ de nødvendige brintatomer til at lukke bindinger). I hver ende sidder et svovlatom + CH_3 , som afslutning på molekylet. Molekylet er 3,2 nm langt er blevet lavet af kemikerne i Nanoscience centret i København. Med så lille et molekyle er udfordringen med at få lavet to ekstremt tætsiddende guldelektroder blevet så meget desto større. Ved at pådampe guld på en isolerende krystal, samtidig med at de målte modstanden mellem de to elektroder, lykkedes det de to russere Sergei Kubatkin og Andrei Danilov fra Chalmers i Göteborg at skabe elektroder med den nødvendige korte afstand. Til slut bringes de københavnske OPV5 molekyler ind på overfladen. Temperaturen hæves en smule og molekylerne begynder at diffundere rundt. Hvis man igen holder øje med den elektriske modstand mellem elektroderne er det muligt at konstatere når et enkelt molekyle har anbragt sig mellem elektroderne, hvorefter temperaturen igen sænkes, og konfigurationen fastfrys.



Figur 8. Guldelektroder pådampes en isolerende krystaloverflade. Kunsten er at gøre gabet mellem de to elektroder så lille som muligt.

Selve Enkelt-molekyl transistoren burde nu være konstrueret, og den udviser da også en flot SET-karakteristik, som vist i figur 6 Endnu tydeligere bevis på, at man faktisk har lavet en SET kan fås, hvis man laver et plot som vist i figur 9. Her er gate-

spændingen ud af x -aksen og source-drain spændingsforskellen op af y -aksen. Endeligt angives strømstyrken mellem source og drain med en farvekode: lyse/gule angiver stærk strøm og mørke/brune svag strøm. Vi ser, at figuren består af en række romber (diamanter), hvor der ingen strøm løber adskilt af kiler af områder med strøm.



Figur 9. Karakteristik for OPV5-transistoren. Langs x -aksen er gatespændingen. Langs y -aksen er angivet source-drain spændingsforskellen. Strømmen styrken mellem source og drain er angivet med farvekode. Lyse farver angiver stærk strøm og mørke farver svag strøm. De mørke rhomber uden strøm kaldes *diamanter* og er karakteristiske for en SET. Højde og bredde af de enkelte diamanter afhænger af koblingen mellem molekyle og elektroder og af molekylets elektronspektrum.

Det vil føre for vidt i denne artikel at gennemgå teorien for disse diamanter. Hvis man kun skulle tage hensyn til ovennævnte Coulomb-blokade, ville alle diamanter være lige store. Forklaringen på, at de ikke er, skyldes at molekylet ikke kan opfattes som et klassisk system. At elektronerne i molekylet overholder kvantemekanikkens love gør, at diamanterne får uens størrelser, og at disse størrelser er karakteristiske for det givne molekyle, og hvordan molekylet er anbragt i forhold til elektroderne.

Fremtiden

På en vis måde kan man sige, at situationen for molekylær elektronik er på samme stadi som halvleder elektronik var i starten af 50'erne. De enkelte komponenter var under store intellektuelle og tekniske anstrengelser blevet konstrueret, men man havde endnu ikke fundet en effektiv og billig måde at lave små funktionelle kredsløb på. Dette gennembrud skete som sagt først i begyndelsen af 60'erne med de integrerede kredse. I dag udføres der mange forsøg på at lave molekylære kredsløb, men de fleste af dem har et element af tilfældighed over sig. Ledninger, som f.eks. kulstof-nanorør, lægger sig tilfældigt på en overflade, og molekyle forbinder tilfældigt disse ledninger og danner transistorer etc. Det der mangler er et teknisk gennembrud som tillader at lave nanoskopiske kredsløb på meget mere intelligent og kontrolleret vis.

Lad os tales ved om ca. 5 år!

Referencer:

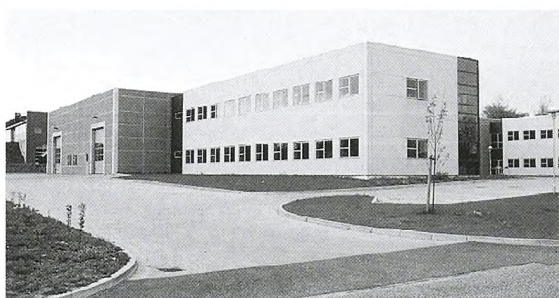
- [1] Den fædrende historie om verdens første elektroniske transistor fra 1949 kan findes i bogen Michael Riordan og Lillian Hoddeson (1997) "Crystal Fire", W. W. Norton & Co.
- [2] Kubatkin m.fl. (2003) *Nature*, bind 425, side 698–701.

NanoNord – en nanoteknologisk virksomhed

Michael Cramer Andersen, Kvant.

I Aalborg, nær Aalborg Universitet, ligger en ny virksomhed – NanoNord A/S [1]. Virksomheden vil udnytte potentialet i nanoteknologien og etablere en direkte vej fra forskning til industriel produktion. NanoNord er grundlagt i 2001 af adm. direktør Ole N. Jensen som er tidligere grundlægger og ejer af en større telekommunikationsvirksomhed i regionen. Den officielle åbning af de nye bygninger fandt sted i oktober 2003 og virksomheden beskæftiger ca. 10 personer.

NanoNord er støttet af EU og den danske stat med samlet 5 mio. kr. til to udviklingsprojekter indenfor audio og medicoindustriene. Øvrige samarbejdspartnere er Aalborg Universitet og Aarhus Universitet. De nye bygninger med avancerede laboratorier etableres sammen med Aalborg Universitet for 25 mio. kr.



Figur 1. Den nanoteknologiske virksomhed NanoNord.

NanoNord efterlyser nu kapital fra industrien. Direktør Thomas Kjær Nielsen udtalte til Weekend-avisen i starten af marts [2], *“Hvis du går til Vækstfonden eller Dansk Kapitalanlæg, som stadig kan mærke smerterne fra IT-boblen, kigger de kun på investeringer, hvor de kan se en exit på 3–4 år. De er helt klart interesserede i nanoteknologi – det er alle, vi har talt med – men det er svært at finde investorer i et lille land som Danmark, når vi taler om projekter med 5–10 års sigte”*. I slutningen af marts kom den første industrielle investor. Vesterhavet A/S, som er moderselskab for rederierne J. Lauritzen og DFDS, indgik en aftale om en kapitaloverførsel af 5 mio. kr. NanoNord var naturligt glad og udtalte i en pressemeddelelse, at *“denne eksterne kapitaloverførsel vil være den vigtigste, fordi det er den første og den lyser vejen op for andre.”*

I nanoforskningen arbejdes der med strukturer der er mindre end støv, så det er nødvendigt at reducere forureningen af støv og mikroorganismer mest muligt gennem luftrensning. En af de større investeringer i opstartsfasen har derfor været et komplet rentrumslaboratorium, som virksomheden har købt i England og netop er ved at indrette på 950 m². Laboratoriet vil desuden indeholde avanceret udstyr til nanoteknologisk ud-

vikling og produktion – bl.a. litografiudstyr, LP-CVD vertikalovne, produktions PVD udstyr, robotsystemer til montage og pakning, semiautomatiske ætsebænke samt avanceret metrologiudstyr. I løbet af 2004 bygges yderligere 1000 m² klasse 1 bio- og fysiklaboratorium og 700 m² undervisningsfaciliteter.

Adm. direktør Ole Jensen forklarer hvor langt NanoNord er kommet, *“Vi er stadig ikke helt færdige med at opbygge vort nye rentrum og har derfor endnu ikke nogle egentlige kunder – dog er vi snart klar til at invitere de første indenfor.”* I sin brochure tilbyder NanoNord præproduktion af nanoprodukter, hvor private virksomheder enten udfører forskningen på egen hånd hos, eller i samarbejde med NanoNord.

Ole Jensen fortsætter, *“Derudover har vi selv startet et par forskningsprojekter bl.a. inden for audio- og medico-området. De nærmere detaljer herom kan vi desværre ikke komme ind på – men vi kan dog løfte slåret lidt og sige, at vi inden for audio-området arbejder med en silicium-baseret højttalertechnologi.”*

Aalborg Universitet er langt fremme indenfor medikoteknik, dvs. instrumenter og udstyr til f.eks. hospitaler. Et mere kommercielt produkt som høreapparater, der kan placeres i øret, er i de senere år blevet gjort væsentlig mindre (og billigere) gennem mikroteknologi og mikroelektronik og denne udvikling kan fortsætte gennem nanoteknologi.

NanoNord har en unik kontakt til universitetsverdenen. Ole Jensen forklarer, *“udover samarbejdet med Flemming Besenbacher og iNANO (ved Aarhus Universitet), kommer vi til at dele hus med Institut for Fysik og Nanoteknologi på Aalborg Universitet. De flytter ind i samme bygning og vil få adgang til mange af de samme ressourcer som NanoNord (laboratoriefaciliteter, rentrum, robotter, osv.) og måske bliver der også fælles udnyttelse af forskere/personale. Studerende vil således komme til at opholde sig i det samme hus som de forskere, der er ansat i den kommercielle verden – dvs. hos NanoNord. Da vi endnu ikke har leveret et færdigt projekt til eksterne kunder, er det svært at sige noget om i hvor høj grad, de studerende vil kunne blive inddraget i konkrete, kommercielle projekter.”* NanoNord håber under alle omstændigheder, at kunne ansætte nogle af de studerende i fremtiden.

Referencer:

- [1] NanoNord A/S, Skjernvej 4A, 9220 Aalborg, www.nanonord.dk
- [2] “Nano hype” af Kristian Hvidtfelt Nielsen, Weekend-avisen 5.-11. marts 2004.

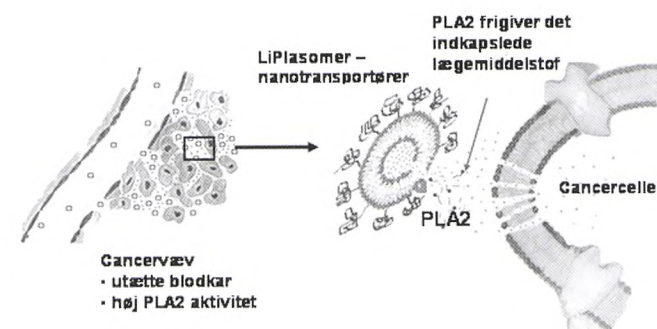
Nanoteknologi i cancerbehandling

Jens Olaf Pepke Pedersen, Kvant.

Kan forskning i nanoteknologi også give en bedre sygdomsbehandling? Det mener et dansk bioteknologisk firma LiPlasome Pharma, der har udviklet et helt nyt nanoteknologisk indkapslingssystem, som målrettet transporterer lægemiddelstoffer via blodet ud til det syge væv. Kort fortalt har firmaet skabt en ny type "smarte" nanopartikler der er "programmerede" til at genkende f.eks. cancervæv og aflevere de giftige anticancer-stoffer netop der, hvor de behøves.

Ved traditionel cancerbehandling ser man ofte skadelige bivirkninger af den medicin, der anvendes til at dræbe cancercellerne, og derfor er der store perspektiver i den metode, som LiPlasome har udviklet og fået patenteret.

I moderne cancerbehandlinger bruger man bl.a. liposomer, som er opbygget af fedtmolekyler, til at indkapsle de lægemiddelstoffer, som man ønsker at behandle med. Med de metoder, der bruges i dag kan man få liposomerne til at flyde med blodet hen til cancersvulsten, hvor de på grund af den lille dimension på omkring 100 nm, kan trænge ud af de små åbninger, der findes i blodkarene omkring cancersvulsten. Det er dog blevet klart at de liposomer, der i dag findes i klinikken kun langsomt frigiver de indkapslede lægemiddelstoffer, der skal dræbe cancercellerne.



Figur 1. Schematisk illustration af grundprincippet bag LiPlasome Pharmas nye målrettede nanoteknologi til behandling af cancer. LiPlasomerne transporteres via blodet ud til cancersvulsten, hvor de bliver genkendt af et lipidspaltende enzym, phospholipase A2 (PLA2), som findes i store mængder i svulsten. Herved frigives de indkapslede anticancer-stoffer netop i cancersvulsten, hvor de skal virke.

Opgaven med at effektivisere metoden vanskeliggøres af, at liposomerne skal være stabile i blodstrømmen, men ustabile, når de kommer frem til cancersvulsten. Udfordringen er derfor at få liposomerne til først at åbne sig og afgive anticancer-stofferne, når de rammer cancersvulsten. Kort sagt skal liposomerne være i stand til at skelne det syge væv fra det raske

væv. LiPlasome har formået at designe materialeegenskaberne af liposomerne således, at de bliver nedbrudt af et bestemt enzym kaldet phospholipase A2 (PLA2), der findes i store mængder i cancersvulsten. På den måde er det lykkedes LiPlasome at konstruere en ny type liposomale nanopartikler (LiPlasomer), som nedbrydes når de støder på PLA2 i cancersvulsten og derfor frigiver anticancer-stofferne præcis der, hvor der er brug for dem.

LiPlasome Pharma har allerede vist, at det aktive genkendelsesprincip virker ved tilsætning af LiPlasomer til cancerceller og ved behandling af cancersyge mus. Det næste skridt er at teste en række udvalgte LiPlasomer i kliniske forsøg for at afklare om de lovende prækliniske forsøg også vil kunne ses i klinikken. På sigt vil en egentlig behandling med LiPlasomer kunne se dagens lys om 3–5 år. Det kræver imidlertid kapital – LiPlasome Pharma finansieres af LEO Pharma A/S og BankInvest A/S, og indtil nu er det lykkedes at rejse en startkapital på 20 mio. kr., men der bliver brug for større investeringer, hvis det skal lykkes at bringe LiPlasomerne helt frem til klinikken.

I en parallel bane arbejder LiPlasome med at videreudvikle grundprincippet til også at skabe et lægemiddelkoncept, hvor nanopartiklen selv er opbygget af en speciel type inaktive lipider (prodrug-lipider), som først bliver aktiveret i svulsten af PLA2. Firmaets patentbeskyttede nanoteknologi kan på den måde skabe en partikel, som både er transportsystem og lægemiddelstof på ét og samme tidspunkt. Dette er et helt nyt og perspektivrigt nanoteknologisk princip i medicinsk cancerforskning, der dog ligger et stykke ude i fremtiden, og som stadig kræver meget forskning- og udviklingsarbejde.

Det ser dog ud til, at der er stor interesse for LiPlasomes nanoteknologi. For nylig blev firmaet inviteret til at præsentere sine resultater for NCI (National Cancer Institute/NHI) i USA, som udtrykte stor begejstring, og nu er parat til at starte flere samarbejdsprojekter omkring den videre udvikling af LiPlasomes nanoteknologi.

LiPlasome er udsprunget for godt tre år siden af Kemisk Institut ved DTU, hvor Kent Jørgensen, der nu er direktør for LiPlasome, sammen med kollegaer forskede i lipidmembraner og liposomer. Firmaet er således skabt på basis af grundforskning af nanostrukturer og har stadig et tæt universitetssamarbejde – både nationalt og internationalt.

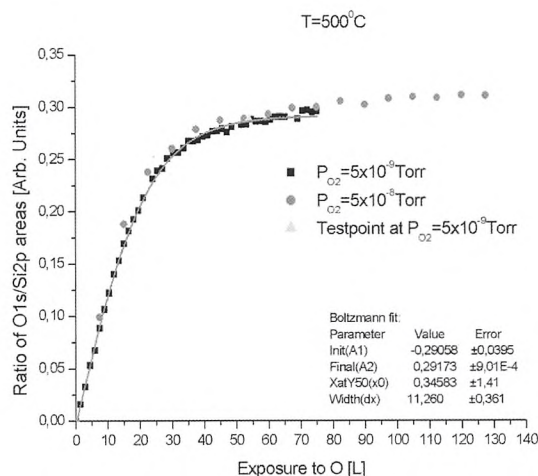
Referencer:

- [1] LiPlasome Pharma A/S, DTU, Bygn. 207, 2800 Kgs. Lyngby.
www.liplasome.com

Ultratynde film på silicium

Per Morgen og Sven Tougaard, Fysisk Institut, Syddansk Universitet, Odense.

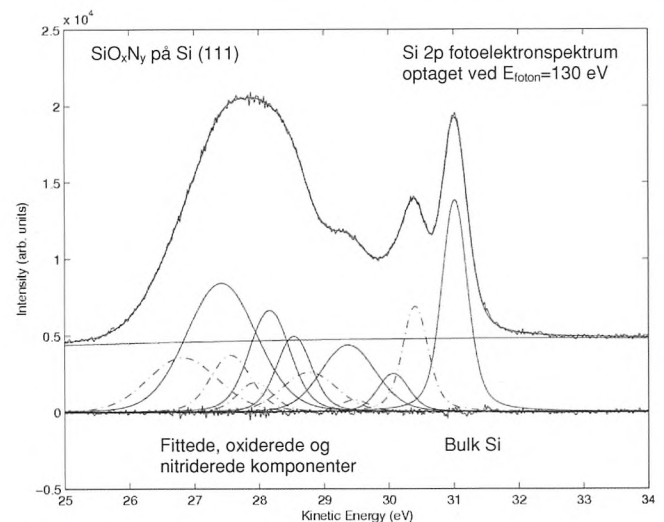
Indenfor mikroelektronik industrien står man i dag overfor den tætteste direkte berøring med nanofænomener, på grund af denne industris krav til formindskelse af f.eks. gate-oxidets tykkelse i CMOS kredse. I en Intel Pentium 4 processor er dette oxidlag i dag 1,2 nm tykt, dvs. det består af ca. 5 lag SiO₂, som yderligere er dopet med kvælstofatomer. I en række projekter udført af gruppen i Odense i samarbejde med forskere i Ålborg og Århus, bruges bl.a. lagringen ASTRID i Århus til studier af vækstbetingelser og de kemiske og elektroniske forhold i sådanne tynde film af metaller, halvledere og isolatorer, som dannes direkte ovenpå rene siliciumoverflader. Vi har udviklet en række nye metoder, baseret på atomart kontrollerede vækstbetingelser og selvbegrænsende reaktioner, til frembringelse af nye nanometer- og subnanometer tynde metalfilm med kvantiserede elektron-tilstande i filmene, samt nye halvledere og isolatorer, til anvendelse i kommende generationer af mikro- og nanoelektronik. Måling af disse systemers dimensioner ("nanometrik") og strukturer ved hjælp af elektronspektroskopi er en vigtig analysemetode, som der er udviklet algoritmer til i Odense.



Figur 1. Isotermisk oxidation af Si (111) 7×7 overfladen.

Som et eksempel vises på figur 1 resultatet af en isotermisk oxidation af Si (111) 7×7 overfladen [1] ved en temperatur på 500°C og to forskellige tryk: Henholdsvis 5×10⁻⁹ Torr og 5×10⁻⁸ Torr. Ved at afbilde resultaterne som funktion af eksponering (1L

= 10⁻⁶ Torr × sekunder) ses kurverne at overlappe. Målingerne er udført med XPS (røntgen induceret fotoemission) i Odense. Forløbet er *et helt andet* end det kendte ved højere tryk og temperatur (Deal-Grove mekanismen). Det *mættende* oxidlag har her en tykkelse på ca. 0,7 nm og er uniformt. De forskellige koordinationsstrin af siliciumatomer med O-atomer kan måles i højtopløst, overfladefølsom, fotoemission af Si2p niveauerne i oxidet og i Si-prøvens overflade, med en informationsdybde på under 2 nm (ved ASTRID). Dette er vist på figur 2. De variabelt oxiderede og nitriderede Si atomer kan "tælles" i disse spektre (igen-nem udfoldning af spektrene i Si (bulk....4+)) og udviklingen i spektrene under væksten kan derved følges og sammenlignes med modeller af oxidets struktur og af koordinationen i grænsefladen mellem oxid og Si. I tilsvarende forsøg dannes tynde nitrider på Si, og andre isolatorer og halvledere som Al₂O₃ og AlN dannes direkte på Si under ultra-høj-vacuum betingelser [2,3]. De nano-spektroskopiske muligheder ved ASTRID er her afgørende for at kunne følge disse processer.



Figur 2. Si2p fotoelektronspektrum.

Referencer:

- [1] www.fys.sdu.dk/surfaces/pdf/urw.pdf.
- [2] [www.fys.sdu.dk/surfaces/pdf/Oxidation properties of Al.pdf](http://www.fys.sdu.dk/surfaces/pdf/Oxidation%20properties%20of%20Al.pdf).
- [3] www.fys.sdu.dk/surfaces/pdf/jfa.pdf.

Kan et metal være en glas?

Nini Pryds, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.

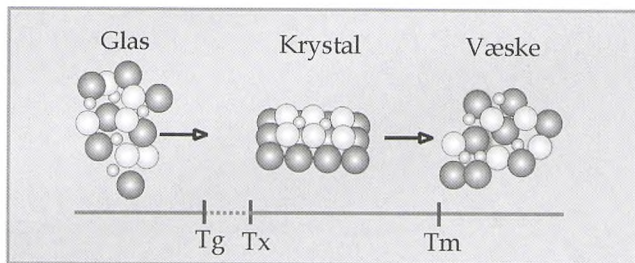
Glas er et mærkeligt materiale. Det er ikke en gas eller væske, og det er heller ikke et helt almindeligt fast stof. En gas indeholder atomer, der kun svagt er bundet til hinanden og bevæger sig næsten frit rundt i rummet. En væske er en uordnet struktur, hvor bindingerne mellem atomerne konstant bliver brudt og kædet sammen igen. I fast stof er atomerne ordnet i en krystal og bliver i store træk på sin plads i et velordnet gitter. Glas derimod ... er ikke som nogen af de ovenstående tilstande. Glas er stift, som et fast stof, men ikke ordnet i et krystallinsk gitter. Der er ikke nogen speciel forskel i strukturen mellem en væske og en glas. I princippet kan glasser dannes af alle materialer, hvis de kunne køles så hurtigt ned fra væskefasen, at væskens struktur bibeholdes, uden at atomerne når at ordne sig i et krystalgitter. Glasmaterialer er bedst kendt fra hverdagens vindues- og flaskeglas. Som bekendt er disse glasser meget hårde, men også sprøde. Mange har også set en glasblæser, som ved hjælp af opvarmning blødgør glasset og former det, som han ønsker. Under bestemte forhold kan selv metaller forme glas. Metallisk glas er ikke gennemsigtigt, som glas vi normalt kender, men den anderledes struktur giver dem en række eftertragtede fordele i deres mekaniske og magnetiske egenskaber.

For at bevare strukturen fra smelten og undgå den almindelige krystalliseringsproces under afkøling fra væske til fast form, kræves der normalt en meget høj afkølingshastighed (10^5 – 10^7 K/s). Den høje afkølingshastighed kan kun opnås i meget tynde lag (typisk 10–50 μm). I de senere år er der blevet forsket i nye multikomponent systemer, som kun har brug for beskedne afkølingshastigheder (<100 K/s). Dette bevirker, at man i dag kan fremstille tykkere prøver af glas metaller (1–70 mm). Sådanne materialer kaldes "Bulk Metallic Glasses" (BMG). Til dato findes der ikke nogen egentlig model eller teori, der kan forudsige hvilken sammensætning der skal til, for at en metalglas kan formes, men der er fremsat flere empiriske regelsæt for, hvordan en BMG kan dannes. Den mest velkendte [1] fastslår, at følgende tre betingelser skal opfyldes: 1) Legeringen skal bestå af mindst 3 forskellige grundstoffer. 2) Grundstoffernes atomstørrelser skal variere signifikant ($>12\%$). 3) Varmen ved blanding af elementerne skal være negativ i væskefasen. En mere uddybende forklaring findes senere i teksten.

En simpel metode til fremstilling af BMG er at støbe den smeltede legering i en støbeform af kobber, der sørger for at varmen fra smelten hurtigt kan ledes væk. Normalt ville man fremstille støbeformen af en forholdsvis stor kobberblok, så dens temperatur kun vil stige lidt under støbeprocessen. På Risø har

vi brugt både en kileformet støbeform (for at kunne opnå forskellige afkølingshastigheder i en støbeprocess med den samme legering) og en støbeform med parallelle plader (for at opnå pladeformede prøver egnet til f.eks. hårdhedsmålinger og kompressionseksperimenter). Teknikken er beskrevet mere detaljeret i [2]. Hvis en BMG gradvis opvarmes, vil den ved den såkaldte glasovergangstemperatur T_g transformeres fra glastilstanden ved lav temperatur til en underafkølet væske ($\Delta T = T_x - T_g$) før den krystalliserer ved en højere temperatur, T_x . Dette illustreres skematisk i figur 1. At en legering kan optræde som en underafkølet væske i et vist temperaturinterval, hvor den er nogenlunde stabil, medfører bl.a. at den er meget let at forme. De interessante anvendelsesmæssige perspektiver vil blive diskuteret senere.

Selv om man i mere end 10 år har vidst, hvordan man kan opnå den underafkølede væske-tilstand, og at den amorfe legering i denne tilstand kan blive meget blød, er der ikke fuld forståelse for de processer, der gør, at glas mister sin stivhed ved opvarmning. At opnå forståelse for denne mekanisme er en betydelig udfordring [3], som hvis den opnås, vil åbne muligheder for en bedre kontrol af disse materials egenskaber.



Figur 1. Skematisk illustration af de overgange, som en amorf legering gennemgår ved opvarmning fra glas-tilstand ved lav temperatur, gennem glasovergangen T_g til en underafkølet væskefase, der ved temperaturen T_x krystalliserer for endelig at smelte ved T_m .

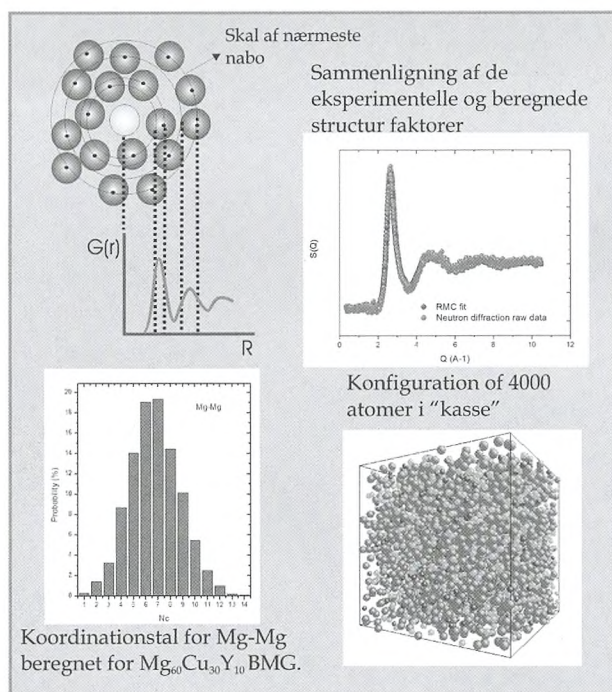
Struktur

Den amorfe natur af glas komplicerer den grundlæggende forståelse af glassens struktur på grund af den manglende mulighed for at anvende klassiske spredningsmetoder som i tilfældet med krystallinske materialer. Glas giver ikke veldefinerede diffraktionstoppe, og følgelig kan rå spredningsdata ikke bruges kvantitativt til karakterisering.

En af de store udfordringer indenfor amorfe materialer er at opstille en strukturmodel, der kvantitativt

stemmer overens med de eksperimentelle diffraktionsdata. "Reverse Monte Carlo" (RMC)-simulering er en metode, der kan reproducere de uordnede 3-dimensionelle strukturer i amorf materialer, som kvantitativt giver anledning til de eksperimentelle diffraktionsdata, der er tilgængelige. I RMC-simulering flyttes atomerne for at minimere forskellen mellem på den ene side den beregnede parkorrelationsfunktion $g^C(r)$ og den beregnede totale strukturfaktor $A^C(Q)$ og på den anden side den eksperimentelt bestemte parkorrelationsfunktion $g^E(r)$ og den eksperimentelt bestemte totale strukturfaktor $A^E(Q)$.

En simulering bruger typisk mindst 1000 atomer placeret i en "kasse" med periodiske grænsebetingelser dvs. kassens omgivelser er en spejling af den selv. Alle atomerne er fra starten placeret tilfældigt rundt i kassen. Dette udgør sammen med kassens dimension startkonfigurationen til simuleringen. Derefter flytter man atomerne i "kassen" så atomerne stemmer overens med de eksperimentelle data. Systemets konfiguration er bestemt af atomernes koordinater og "kassens" dimension. Den endelige konfiguration bruges til at bestemme koordinationsstal af den amorse struktur. Dette metode blev brugt til at bestemme koordinationsstallene for BMG $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ (figur 2).

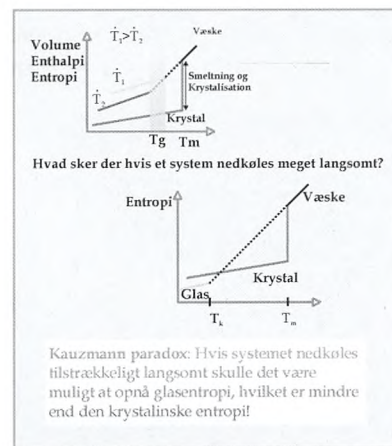


Figur 2. Illustration af RMC-model, der blev brugt til at frembringe den lokale struktur af $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ metallisk glasmasse.

Glasovergang

For at BMG kan bibeholde smeltens struktur under afkøling og derved forhindre krystallisation kræves det ofte at forskellige atomstørrelser benyttes. Derved gøres det mere besværligt for atomerne at ordne sig i en

regelmæssig struktur under afkøling. Under afkølingen bliver den underafkølede flydende masse mere og mere tæt, og atomerne i massen bliver fanget i et bur dannet af deres naboer. Viskositeten øges derefter drastisk, og den underafkølede flydende masse er blevet til fast glas. Denne proces er kendt som *glasovergang*. Ved temperaturer, der ligger under glasovergangstemperaturen T_g , er atommobiliteten for lav, til at krystallisering kan finde sted.

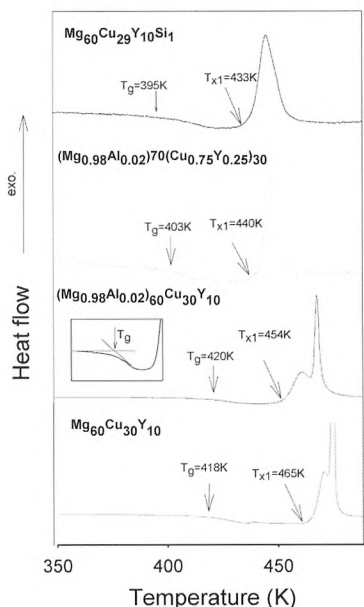


Figur 3. Ændringer af volumen, entropi og enthalpi som funktion af temperatur.

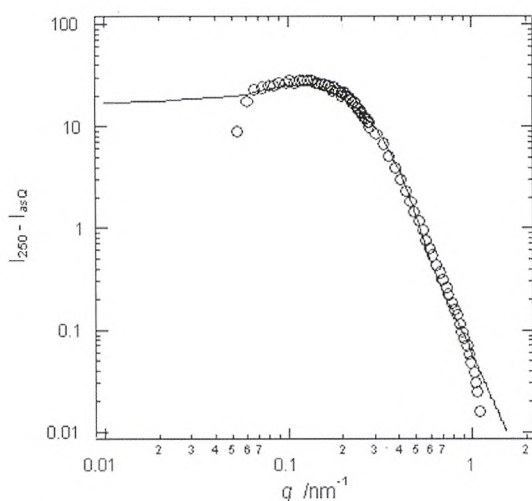
Glasovergang viser sig som en tydelig forandring af mange egenskabers temperaturafhængighed, herunder volumen (eller massefylde), entropi, enthalpi og elastiske konstanter. Hvis man f.eks. ser på en kurve for volumen som funktion af temperatur, kan man se, at den termiske udvidelse gennemgår en pseudo-andenordens overgang ved glasovergangstemperaturen T_g , hvilket afspejles i en ændring af kurvens hældning. T_g er dog ikke en helt veldefineret temperatur og kan derfor ikke betragtes som en materiale konstant, idet den er følsom over for opvarmningshastighed og/eller afkølingshastigheden ($\dot{T}$), som illustreret på figur 3. Typisk kan T_g variere med 10–20 % afhængig af afkølings/opvarmningshastigheden. Overgangen fra flydende tilstand til glas er kontinuert i modsætning til overgangen fra flydende til krystallinsk tilstand, der er diskontinuert (1. orden transition).

Ved at lynafkøle en væske, er det muligt, at reducere atomernes mobilitet så meget, at de ikke har energi nok til ordne sig indbyrdes i et periodisk gitter vha. diffusion. Hvis kølehastigheden derimod er for langsom, og der er god mulighed for kim-dannelse, vil materialet krystallisere under smeltetemperaturen T_m , som det normalt er tilfældet for krystallisation af metaller. Glasovergangstemperaturen T_g er som nævnt før afhængig af kølehastigheden, hvilket medfører at jo lavere kølehastighed jo lavere T_g (figur 3 viser forskellen i glasovergangstemperaturen når $\dot{T}_1 > \dot{T}_2$). Hvis vi nu forestiller os, at væsken nedkøles med lave kølehastigheder, uden at den krystalliserer, vil entropien

af den underkølede væske ved en given kølehastighed blive lavere end entropien af den krystallinske fase, et fænomen som kaldes Kauzmanns paradoks. En lavere entropi ville betyde, at strukturen af den underkølede væske i princippet skulle besidde højere orden end den tilsvarende krystallinske fase. Som bekendt er den krystallinske fase den højeste form for orden, derfor kan en væske ikke nå denne tilstand.

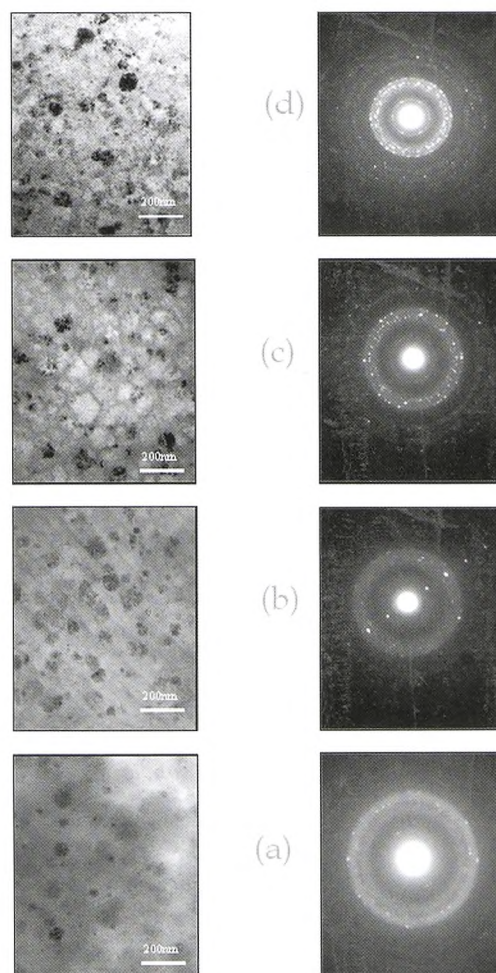


Figur 4. DSC-kurver ved opvarmning af forskellige amorfe Mg-baserede legeringer. Den endoterme glasovergang er markeret med T_g og den eksoterme krystallisation med T_x . I temperaturområdet mellem T_g og T_x er legeringerne underafkølede væsker. Alle kurverne er taget ved opvarmingshastighed på 0.033K/s [6].



Figur 5. SANS-resultater for en legering med sammensætningen $\text{Mg}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$. Datapunkterne viser ændringen i spredningsintensiteten ved opvarmning af legeringen fra stuetemperatur, hvor den er glas, til 523 K, hvor den er delvist krystalliseret. Den større spredning stammer fra de krystallinske nanopartikler, der dannes. Den fuldt optrukne linie er en tilpasningsmodel til datapunkterne. Herved anslås partiklernes gennemsnitlige diameter til at være 11 nm [7].

De forskellige overgangstemperaturer bestemmes ofte ved hjælp af "Differential Scanning Calorimetry" (DSC). Figur 4 viser DSC-kurver for amorfe Mg-baserede legeringer. Som ses af figuren, varierer T_g som funktion af materiale-sammensætningen. De overgangstemperaturer, der ses i figuren, er defineret som transition start punkt (se den indsatte figur i figur 4). Glasovergangen ses som en svagt endotermisk proces, mens krystallisationen ses som en eller flere skarpe (eksoterme) toppe. Den første krystalliseringsovergang tilskrives dannelsen af den intermetalliske fase Mg_2Cu .



Figur 6. TEM billeder og tilsvarende diffraktionsmønstre af opvarmede $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ prøver med henholdsvis 15 volumenprocent (a), 50 volumenprocent (b), 75 volumenprocent (c) og 100 volumenprocent (d) krystallinitet. Man ser at både størrelsen og mængden af krystallitterne øges med stigende temperatur [8].

Nanokrystallisering

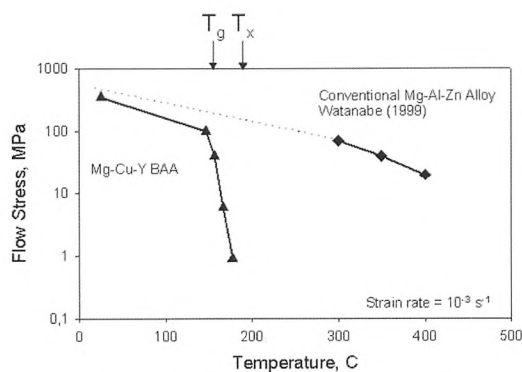
Det er muligt at opnå forbedringer af BMGs egenskaber, specielt de mekaniske og magnetiske egenskaber, hvis man lader legeringen krystallisere delvist, hvorved den omdannes til en nanokomposit af nanokrystallitter i en amorf matrice. En kontrol af kornstørrelsen fra

nanometer størrelse og op til store makroskopiske korn vil kunne bruges til at kontrollere materialets egenskaber i et vist omfang. Dette kan opnås ved at opvarme materialet forbi de forskellige overgangstemperaturer. Det er således vigtigt at forstå krystallisationsprocesserne.

Hvis en væske bliver nedkølet til under smelte-temperaturen, vil forskellen i Gibbs fri energi mellem væskefasen og den krystalline fase være drivkraft for kim-dannelse af nye krystaller, hvorimod grænsefladen væske/krystal skaber en positiv grænsefladeenergi, der bremser kim-dannelsen. Dette resulterer i en energibarriere som en lokal fluktuation i kompositionen omkring grænsefladen skal overvinde for at danne et kim. For at kimet kan vokse videre, skal atomerne i væsken have mulighed for at ordne sig. Hastigheden af atomtransporten i materialet bestemmes af atomernes diffusivitet og viskositet.

Når BMG bliver udglødet omkring glasovergangstemperaturen T_g vil atomerne i strukturen ordne sig ved bevægelser over meget korte afstande, denne proces kaldes strukturel relaxsation. Relaxationsprocessen i metallisk glas er forbundet med frigivelse af indre energi i materialet. Denne ordning af atomerne giver mulighed for at danne klynger af tæt atompakning, klynger der i en efterfølgende krystalliseringsproces kan fungere som kim for ny krystaldannelse.

I de forskellige stadier af nanokrystallisation kan krystallernes størrelse observeres f.eks. ved hjælp af småvinkel neutronspreddning (SANS) eller transmissions-elektronmikroskopi (TEM). Figur 5 viser resultatet af en SANS måling på en $(\text{Mg}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ legering. Datapunkterne viser forskellen i spredningsintensitet mellem prøven opvarmet til 523 K og den amorf prøve. Den større småvinkel spredning efter opvarmning skyldes dannelsen af krystallinske partikler i den amorf matriks. Ved tilpasning af en passende model til datapunkterne (den optrukne kurve) opnås et mål for partiklernes gennemsnitlige diameter på 11 nm [7].



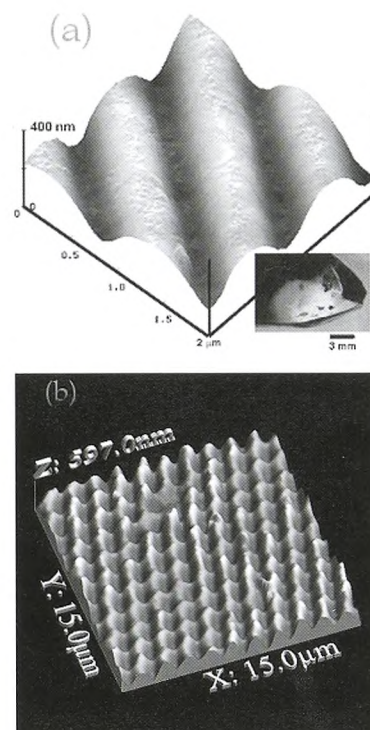
Figur 7. Flydespændingen for en $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ amorf legering som funktion af temperaturen. Et drastisk fald i flydespændingen finder sted i den underafkølede væske-tilstand mellem glasovergangstemperaturen T_g og krystalliseringstemperaturen T_x . Til sammenligning er også kurven for en konventionel Mg-Al-Zn-legering indtegnet.

Som illustreret i figur 6 kan man kontrollere graden af krystallisation ved at opvarme den amorf legering til en temperatur mellem T_g og T_x i forskellige tidsrum. Figur 6 viser TEM billeder af en amorf $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ legering, der har været opvarmet til 447K i henholdsvis 30 min. (figur 6a), 40 min. (figur 6b), 50 min. (figur 6c) og 120 min. (figur 6d). Andelen af nanokrystaller er ca. 15, 50, 75 og 100 volumen%.

Formning af metallisk glas

Den stigende anvendelse af mikro-elektromekaniske systemer (MEMS) har ført til en voksende efterspørgsel efter teknologier, der kan fremstille små komponenter. Som nævnt ovenfor bliver BMG blød, når den er i den underafkølede væske-tilstand. Det synes derfor en oplagt mulighed at udnytte denne egenskab i fabrikationen af forskellige dele i mikro- og nano-målestok, der kan indgå i MEMS.

Figur 7 er en illustration af en amorf magnesiumlegerings evne til at deformeres, når den er i den underafkølede væske-tilstand. Figuren viser på en logaritmisk skala materialets flydespænding som funktion af prøvens temperatur. Mens en konventionel Mg-baseret legerings flydespænding aftager forholdsvis langsomt med stigende temperatur, viser BMG's flydespænding et drastisk fald på mere end to størrelsesordener i temperaturområdet mellem T_g og T_x , hvor materialet er en underafkølet væske [9].



Figur 8. AFM-billeder af to forskellige sinus mønstre, dannet på en amorf $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ legering ved at presse den i mindre end 30 sekunder mod en matrice med et lignende mønster ved en temperatur på under 448K. Det lille billede viser diffraktion af lys fra overfladen på den ene prøve.

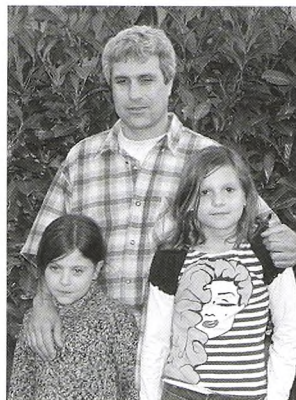
Mg-baserede legeringers gode formningsevne og den lave glasovergangstemperatur gør disse legeringer potentielt yderst velegnede til fabrikation af komponenter med meget små dimensioner, da kun atomernes størrelse i princippet synes at sætte begrænsninger for, hvilke størrelser der kan fremstilles. Som illustration af hvordan man kan opnå fine mønstre ved en simpel presning af en amorf legering viser figur 8 et "Atomic Force Microscope" (AFM) billede af et sinusformet mønster. Dette er dannet ved, at presse en amorf $\text{Mg}_{60}\text{Cu}_{30}\text{Y}_{10}$ legering mod en matrice med et lignende mønster. Matrizen er fremstillet ved fotolitografi og efterfølgende deponering af et nikkel-lag. Sinusmønstret har en bølgelængde på 1 μm , og afstanden fra bund til top er ca. 160 nm. Selv uden et AFM kan man med det blotte øje se, at et mønster med typiske dimensioner i mikrometer skala må være dannet i legeringen ved presningen, idet der opstår et tydeligt farvespil i materialets overflade, som skyldes diffraktion af lys. Dette er vist på det lille billede (figur 8a).

Denne artikel udspringer af arbejdet på Risø med amorfe legeringer, der foruden forfatteren har involveret en række af hans kolleger: Allan Schrøder Pedersen, Morten Eldrup, John Wert, Søren Linderøth, Bente Lebech, Ulrike Wolf, Masato Ohnuma, Stinus Jeppesen, Anders Reves Dinesen og Erlin Zhang.

Referencer:

- [1] A. Inoue, T. Zhang og A. Takeuchi (1997) *Appl. Phys. Lett.*, bind 71, side 464–466.
- [2] N. H. Pryds, M. Eldrup, M. Ohnuma, A. S. Pedersen, J. Hattel og S. Linderøth (2000) *Mater. Trans. JIM*, bind 41, side 1435–1442.

- [3] K. Binder, J. Baschnagel, W. Kob og W. Paul (1999) "Physics Worlds", December, side 54.
- [4] N. Pryds m.fl. (2004) vil blive publiceret.
- [5] W. Kauzmann (1948) *Chem. Rev.*, bind 43, side 219.
- [6] N. Pryds (2004) *Mater. Sci. Eng. A*, i trykken.
- [7] M. Ohnuma, N. Pryds, S. Linderøth, A. S. Pedersen, M. Eldrup og J. S. Pedersen (1999) *Scripta Mater.*, bind 41, side 889.
- [8] U. Wolf, N. Pryds og J. Wert (2004) *Scripta Mater.*, bind 50/11, side 1385–1388.
- [9] J. A. Wert, N. H. Pryds og E. Zhang (2001) "22nd Risø International Symposium on Materials Science: Science of Metastable and Nanocrystalline Alloys – Structure, Properties and Modelling", Dinesen, A.R.; Eldrup, M.; Juul Jensen, D.; Linderøth, S.; Pedersen, T.B.; Pryds, N.H.; Schrøder Pedersen, A.; Wert, J.A. (red.), 3–7 September 2001, <http://www.risoe.dk/afm/Symp22/procelec.htm>



Nini Pryds er seniorforsker ved afdelingen for materiale forskning ved forskningscenter Risø. Han beskæftiger sig bl.a. med eksperimentelle studier af amorfe og nanokrystallinske materialer samt kim dannelse og vækst af ikke-ligevægt materialer. Desuden arbejder han også med fremstilling og karakterisering af tynd film.

Tidens paradoks

Michael Cramer Andersen

Anmeldelse af "tid – fysiske, filosofiske og videnskabsteoretiske perspektiver"

Forfatter Jan-Kyrre Berg Olsen (red.).

Biofolia 2004, 208 sider, 225 kr. (www.biofolia.dk).

Denne bog om tid beskæftiger sig med tiden indenfor fysikken eller set i relation til fysikken, der må betragtes som grundvidenskab. Bogen indeholder otte artikler skrevet af danske og norske forskere. Artiklerne er samlet af Jan-Kyrre Berg Olsen som også har redigeret bogen. Han har skrevet en ph.d. afhandling som handler om relationen mellem fysikkens tidsbegreber og den menneskelige erfaring af tid, "Time in Experience and Science" (2003).

Stig Andur Pedersens skriver i forordet at tiden er et paradoks. Vi kan forme fremtiden og vi oplever at begivenheder i fremtiden bliver aktuelle og forsvinder i fortiden, som er fast og uforanderlig. Er det kun "nuet" der er virkeligt? Hvordan forstår man tidens pil? Mange af de processer der præger vores liv er irreversible. Udviklingen fra fødsel til død kan ikke vendes om. Men de grundlæggende fysiske love er tidsinvariante og fysiske processer kan ligeså godt forløbe omvendt. Forskellige dele af fysikken anven-

der tiden forskelligt. Termodynamikken, anviser en mulig definition af tidens retning gennem entropisætningen, men den kan ikke udledes fra mere grundlæggende teorier uden problemer. I Einsteins relativitetsteorier må vi opfatte tiden i kombination med rummet hvorefter der ikke er nogen absolut tid og ikke noget "nu" som er mere virkeligt. Alle begivenheder danner tilsammen en verdenslinje hvor hver begivenhed udgør et statisk punkt. Skellet mellem fortid og fremtid har tilsyneladende ingen realitet. Dette problem diskuterer en af bogens forfattere (Jan Faye) og giver en mulig løsning på.

Redaktøren, Berg Olsen, angriber fysikkens objektive tid som medfører at menneskets erfarede tid og tidens retning blot er en illusion (side 12), "Hvis man betragter tiden ut fra mikrofysikkens perspektiv, er man kritisk til erfaringens temporalitet – man antar som regel at tiden i den menneskelige erfaring er en illusion. Eller er det den objektive, vitenskapelige tids mangel på en bestemt udviklingsretning som er konstruktionen? Er den vitenskapelige tid således intet andet enn idealiseringer av abstraksjoner av den tid vi erfarer? Hva er egentlig tiden i fysikken?" Citatet er på norsk, som er en del af bogens sprog, men det hindrer ikke læsningen nævneværdigt. Bogen sigter mod at formidle moderne filosofi og videnskabs forsøg på, at bestemme grænsen mellem den objektive tid, som forudsættes at være den virkelige tid, og den subjektive tid, som mennesket oplever. Men

hvad er fysikkens objektive tid? Hvordan adskiller det sig fra den tid, som vi oplever? Er den tid, vi oplever, ikke virkelig? Interessante spørgsmål både for forskere og andre, der interesserer sig for tidens paradoks. De fleste artikler er vel-skrevne, men ved at de spænder så vidt er der også passager som er af mindre interesse.

To nordmænd lægger for med historiske analyser af tidsbegrebet. Ragnar Fjelland, professor i videnskabsteori i Bergen, viser i sin gennemgang af tidsbegrebet, fra de græske naturfilosoffer over Galilei til moderne relativitetsteori, at et geometrisk tidsbegreb ikke er fuldstændigt, da det ikke kan forklare menneskets oplevelse af tiden og hvordan vi bruger den. Olav Arnfinn Laudal, professor i matematik i Oslo, søger svar på spørgsmålene om hvordan vores rumforståelse er og hvad vores forhold til tiden er? Han gør rede for hvordan de matematiske begreber om rum og tid har udviklet sig siden højmiddelalderen hvor Augustin sammenfattede de antikke tanker om rum og tid. Malerkunstens udvikling af perspektivet hjalp med at abstrahere det tredimensionelle rum og beskrive det matematisk og Descartes indførte koordinater til at beskrive punkter i rummet (det kartesiske rumbegreb). I dag er rum og tid vævet sammen og der er mange alternative forklaringsmodeller. Laudal bevæger sig ind i relativitetsteoriens metrik for rumtiden og når frem til (som også Augustin hævdede), at "tiden er et slags rum, ..., nemlig rummet af alle de ting man vælger at betragte. Og målet på tid er en metrik på dette rum."

Herefter følger fem bidrag fra danske forskere. Jan Faye, lektor i filosofi i København, spørger om hvad fysikken kan fortælle om tidens pil. Han taler for, at fysikkens objektive tid ikke har nogen foretrukken retning. At den subjektive tid har en retning hænger sammen med menneskets psykologi. Faye gennemgår den psykologiske tidspil, den termodynamiske og den kosmologiske pil og Stephen Hawkings forklaring af, at disse tre tidspile opleves at gå i samme retning. Faye diskuterer endvidere hvordan tiden forholder sig til processer der medfører udvikling og forandring og stiller spørgsmål ved, om det er tidens retning som bestemmer hvordan fysiske processer forløber eller om det modsatte kan være tilfældet, som mange moderne fysikere mener. I stedet for at bruge forskellige tidsopfattelser fra forskellige dele af fysikken, så kan man anvende den kausale tidspil og simpelthen lade tidens retning være bestemt af at årsag skal komme før virkning og bruge ordningen af begivenheder til at bestemme tidens forløb. Der findes to løsninger til Einsteins firemomentvektor, $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, der beskriver en partikel med en bestemt masse og impuls i rumtiden. En løsning med positiv energi (som normalt bruges) og én løsning med negativ energi (som fik Dirac til at postulere eksistensen af antipartikler). Faye foreslår, at bruge energiens positive retning som den kausale retning frem i tiden. Tidens retning bestemmes således af samtlige kausale processer i verden. Faye foreslår at man fortolker den negative løsning som den del der beskriver fortiden, på partiklens verdenslinje, og den positive løsning som den del der beskriver fremtiden. Det harmonerer fint med den gængse fortolkning, at antipartikler kan betragtes som almindelige partikler, der bevæger sig baglæns i tiden. Grunden til at vi ikke ser virkning komme før årsag er, at energien normalt er positiv.

Peter Øhrstrøm, professor i videnskabshistorie i Ålborg, sammenligner den statiske tidsopfattelse i fysikken med en dynamisk, udviklende tid som skelner mellem fortiden, nuet og fremtiden. I A.N. Priors tidslogik er "nuet" det virkelige. Prior var imod en relativisering af tiden fordi det også ville

medføre en relativisering af eksistensbegrebet (to iagttagere der mødes kan ikke blive enige om hvad der eksisterer), men han var klar over at hans tidslogik var i konflikt med fysikken.

Mogens Wegener, lektor i filosofi i Aarhus, taler også for et dynamisk syn på tiden (Prior), som indebærer en fundamental udvikling på alle niveauer af virkeligheden (det er ikke helt klart for kvantepartikler). Wegener mener derfor, at tiden har en bestemt retning, og han er derfor uenig med Faye på dette punkt. I kosmologien benyttes en såkaldt "kosmisk tid" til at beskrive Universets udvikling. Den gængse opfattelse kritiseres af Wegener som i stedet fremdrager den britiske kosmolog Edward Arthur Milnes ider om universel samtidighed og "verdenstid". Milne forsøgte at forklare galaksernes observerede voksende hastigheder (Hubbles lov) uden relativitetsteorien. I følge Milne skulle hans verdenstid kræve, at der er vinkelbevarelse (isotropi) under en altomspændende spredningsbevægelse (Universets udvidelse).

Simon Olling Rebsdorf, ph.d. i Aarhus, gennemgår Milnes kosmologi mere systematisk og mere kritisk end Wegener. I Rebsdorfs bidrag får vi således at vide, at Milnes "kinematiske relativitetsteori" ikke har mange tilhængere i dag, men at de tidlige ider var med til at inspirere Robertson og Walker til – uafhængigt af hinanden – at opstille en metrik for Universet hvor hovedantagelserne er 1) en kosmisk tid, der er ortogonal på det tredimensionelle krumme rum og 2) det kosmologiske princip, ifølge hvilket stof og energi er fordelt homogent og isotropt. Milne var central i udbredelsen af det kosmologiske princip og Robertson-Walker-metrikken er stadig helt central i kosmologien. Milnes ider om en verdenstid er imidlertid gået i glemmebogen i kosmologien, men de har haft stor filosofisk interesse idet standardkosmologien slet ikke beskæftiger sig med tid.

Helge Kragh, professor i videnskabshistorie i Aarhus, spørger om naturkonstanterne afhænger af den kosmiske tid? Han pointerer, at udviklingsperspektivet, som erstattede et statisk billede af naturen, trådte ind i de geologiske, astronomiske og biologiske videnskaber i sidste halvdel af 1700-tallet, men kun i ringe grad i fysikken. Fysikken har med sine naturlove og konstanter giver et anderledes sikkert holdepunkt i en verden der ellers er præget af fænomener i forandring. I virvarret af parametre optræder en stribe fundamentale størrelser som f.eks. G , e , c , $\hbar$, α samt masserne for elektronen og protonen. Disse og andre fundamentale størrelser kan kun måles, og kan ikke udledes (endnu) af mere fundamentale teorier, da de netop udgør en del af fundamentet; de er irreducibile. De er desuden vigtige forudsætninger for hvilke stabile strukturer der kan eksistere. Hvis de fluktuerede ville verden se radikalt anderledes ud. Det antages, at de ikke varierer i hverken rum eller tid, hvorfor vi kan lære mange ting om fjerne stjerner og galakser ved at studere lyset fra dem. Der er imidlertid gjort mange forsøg på at lade visse af størrelserne variere med tiden. Det kunne jo være at de ændrede sig så langsomt at de kun tilsyneladende var konstante? Det ville betyde, at naturlovene udviklede sig med tiden og fysikken ville have færre faste holddepunkter, ligesom de andre naturvidenskaber. Modstanden mod denne id har været stor. I 1930'erne kom Milnes kosmologi med G , der afhang af tiden og i 1937 forsøgte Dirac at lade G afhænge af tiden for at det totale antal partikler i universet var lig en bestemt kombination af andre konstanter. Eddington forsøgte at forklare den numeriske værdi af finstrukturkonstanten, α , og etablerede derved en uheldig forbindelse mellem naturkonstanternes værdi og numerologien. Der er siden gjort mange forsøg på at udlede den måske lidt overraskende værdi $\alpha^{-1} \cong 1/137$, oftest ved brug af

meget spekulativ fysik. De fleste mener at tallet 137 ikke har nogen betydning og den rigtige værdi afviger da også noget herfra. Målinger af variationen af forskellige fundamentale konstanter har for længst aflivet de berømte teorier. Anderledes forholder det sig imidlertid med variationen af α . De første spekulationer om at α varierer med tiden kom i 1930'erne som et forsøg på at bortforklare galaksernes rødforskydning og derved sikre et statisk univers. I 1967 ændrede George Gamow Diracs hypotese, så det var α der varierede med tiden i stedet for G , men målinger af galakser og kvasarer afviste denne id. Der var ingen eksperimentelle grunde til at betvivle, at α var konstant over astronomiske tidsrum indtil 2001. Her offentliggjorde astronomer overraskende målinger, foretaget med Keck-teleskopet, der påviste at α var mindre i den fjerne fortid med en forskel på omkring 10^{-5} i forhold til den nuværende værdi. Målingerne, som

siden er blevet bekræftet, har medført fornyet interesse for variationen af de fundamentale størrelser og givet flere muligheder for at opstille kosmologiske teorier. Det diskuteres blandt andet om det er e eller c der har varieret.

Jan-Kyrre Berg Olsen afslutter bogen med en diskussion hvor mange fysikere (f.eks. Poincaré, Einstein, Eddington, Feynman og Penrose) og filosofers synspunkter koges sammen. Tidens paradoks løses måske ikke, men opløses lidt hvis man betragter forskellige opfattelser af tiden som forskellige perspektiver, eller måder at fokusere på bestemte træk ved virkeligheden. Den erfarede tid vil også altid fokusere på bestemte træk.

Bogen er inspirerende læsning og kan varmt anbefales, særligt hvis man er interesseret i de filosofiske aspekter af fysikken, men er nogle steder lidt tung.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Wieth-Knudsen Observatoriet

Søndag den 4. juli 1999 blev Dr. N. P. Wieth-Knudsen Observatoriet indviet for anden gang, på 40 års dagen for den første indvielse i 1969. Siden da har Astronomisk Selskab varetager drift af observatoriet til stor glæde og astronomisk udbytte for både foreningens medlemmer og de mange gæster, der har besøgt stedet. Begivenheden blev fejret med en reception ved observatoriet den 4. juli, og den sidste weekend i august, fra fredag den 27. august kl. 18 til søndag den 29. august kl. 14 inviterer vi alle interesserede til et par dages stjerneparty. Programmet kommer til at omfatte observationer – både af Solen og nattehimmelen – foredrag samt præsentation af observatoriets og deltageres teleskoper og andet udstyr.

Tisvilde og omegn har meget at byde på i turistmæssig henseende. Derfor er programmet opbygget med forholdsvis få faste punkter, så deltagerne kan få mulighed for at tage til stranden, i skoven eller til andre steder i løbet af weekenden. I Tisvildeleje et par kilometer fra observatoriet er der et stort antal spisesteder, så vi regner med at deltagerne selv sørger for at få mad og drikke efter behov. Vi vil arrangere et eller to fælles måltider, som de, der ønsker det, kan deltage i. Overnatning er også et område, hvor deltagerne selv kan indrette sig efter egne ønsker. Bor man i nærheden kan man tage hjem og ellers kan man overnatte på et af egnens hoteller, pensioner eller hytteudlejninger. Der er også mulighed for at stille telte op ved observatoriet. Teleskoper og andet udstyr kan låses inde når det ikke er under opsyn.

Der er på den måde tale om en struktur, som er radikalt anderledes end andre weekendarrangementer, hvor deltagerne indkvarteres et mere eller mindre afsides sted og gennemgår et program, hvor også f.eks. måltider og ekskursioner er fastlagt. Vi håber mange vil synes om denne form, der giver mere plads til individuel udfoldelse. Der er også bedre mulighed for at familien kan få fornøjelse af at komme med i de tilfælde hvor man har ægtefælle, børn eller forældre, der ikke synes om at tilbringe en weekend med at diskutere okularer og anden teleskopeteknik. Vil man kun deltage i dele af arrangementet kan det naturligvis også lade sig gøre.

De udgiftskrævende ting som forplejning og overnatning varetages af deltagerne selv. Derfor koster det ikke noget at være med, bortset fra eventuelle udgifter til fællesmåltider.

Detaljer i programmet vil kunne læses på Astronomisk

Selskabs webadresse as.dsri.dk/wko og bliver præsenteret på både AS-mailinglisten og astrolist.

Foredrag i efteråret: Mars anno 2004

Ved juletid 2003 ankom den første europæiske rumsonde nogensinde til Mars og få uger senere landede NASA's marsrobotter Spirit og Opportunity medbringende bl.a. danske eksperimenter. Disse missioner har siden leveret et væld af billeder og målinger, der har bidraget til større viden om den røde planet. Ikke mindst vores indsigt i vandets historie er blevet bedre og det puster nyt liv i diskussionen om, hvorvidt livet er opstået på Mars.

- *Morten Bo Madsen/Preben Bertelsen:*
Resultater fra Spirit og Opportunity. 6. september i København – 13. september i Århus
- *Christine Schøtt Hvidberg/Karen Guldback Schmidt:*
Is og vand på Mars – nu og i fortiden. 27. september i København – 4. oktober i Århus
- *Søren Larsen:*
Vejret på Mars. 25. oktober i København – 1. november i Århus
- *Jonathan Merrison/Palle Gunnlaugsson:*
At genskabe Mars på Jorden: laboratoriesimuleringer og analogier. 15. november i København – 22. november i Århus
- *Per Nørnberg:*
Rejser til Mars og drivkraften bag udforskningen af planeten. 6. december i København – 13. december i Århus

Foredragene finder sted **kl. 19.15** på adresserne:
København: Auditoriet, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

Århus: Matematisk Institut, Aarhus Universitet, Ny Munkegade, Bygning 530, 8000 Århus C.

Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Tycho Brahe Planetarium og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Michael Linden-Vørnle, Kristian Pedersen, Michael Quaade og Bjarne Thomsen.

Nanoteknologi på DTU

Jens K. Nørskov, Jørn M. Hvam, Jakob Schiøtz, Theodor Nielsen, Anders Kristensen og Jens Ulstrup, NANO•DTU, Danmarks Tekniske Universitet.

Nanoteknologi er en fællesbetegnelse for skabelsen af nye materialer og processer på nanometer skala. Det er i bund og grund en ingeniøraktivitet. Målet er at lave nye strukturer, der har eftertragtede egenskaber – nye, mindre komponenter til elektronik eller fotonik; nye katalysatorer til forureningsbekæmpelse eller energifremstilling, eller nye biosensorer. Man kan sige, at nanoteknologi er den ultimative ingeniørvidenskab. Da en nanometer er det samme som et par atomdiametre, handler nanoteknologi i den sidste ende om at kunne bruge naturens egne byggesten – atomerne – til at designe nye materialer.

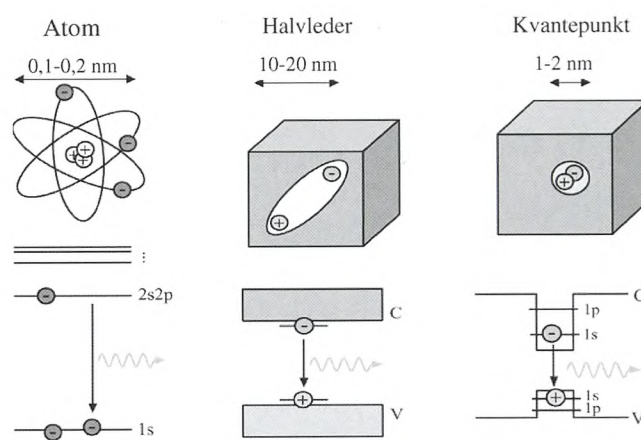
Nanoteknologi er imidlertid et produkt af – og tæt forbundet med – naturvidenskaben, og den baserer sig på en række måleteknikker og teoretiske metoder, der er udviklet i faststoffysikken, i kemien og i biokemien. Når man så begynder at “lege” på nano-niveau, kan man ikke undgå at skabe ny indsigt, også selvom et af hovedformålene er at skabe nye materialer. Nanoteknologi er derfor en interessant blanding af naturvidenskab og teknisk videnskab, af ny erkendelse og nye materialer. Det er de store tekniske og økonomiske perspektiver i nanoteknologien, der i disse år tiltrækker så mange penge til området, mens det i lige så høj grad er de erkendelsesmæssige udfordringer, og det spændende ved at bevæge sig ud i ukendt territorium, der tiltrækker mange unge forskere.

Man deler ofte nanoteknologi op i “top-down” og “bottom-up” nanoteknologi. Det første består i at forfine metoder, der har været brugt på mikrometer-niveau – f.eks. inden for mikroelektronik – til at strukturere materialer på en endnu mindre skala. Den anden tilgang består populært sagt i at samle materialer atom for atom. Oftest lader man vekselvirkningerne i systemerne selv klare opgaven i det man kalder selvorganisering.

På NANO•DTU satser vi kraftigt på alle tilgange og niveauer inden for nanoteknologien. Der er omkring 40 professorer og lektorer inden for området og 40 post docs – dvs. gæsteforskere, der typisk kommer fra udlandet. Herudover er der omkring 50 Ph.D. studerende inden for NANO•DTU. Vi beskæftiger os med både “top-down” og “bottom-up” forskning, og vi dækker hele spektret: Lige fra meget grundlæggende research til teknisk avanceret forskning og fabrikation af nye komponenter. NANO•DTU bruger også mange af sine kræfter inden for anvendelsen af ny nanoteknologi, og arbejder tæt sammen med størsteparten af dansk industri inden for området. Specielt er der netop åbnet en ny stor renrumsfacilitet, DANCHIP, som kan bruges til at lave alt fra grundlæggende forskning til prototyper

og småskala produktion. Den type faciliteter er ikke mindst vigtige i forbindelse med opstarten af nye virksomheder indenfor området.

I det følgende har vi udvalgt fire eksempler, der dækker det brede spektrum af nanoteknologi forskning på DTU. Du kan få et endnu bedre overblik over aktiviteterne ved at se på NANO•DTUs hjemmeside: www.nano.dtu.dk.



Figur 1. Elektronstruktur i et atom, en halvleder og et kvantepunkt. I en halvleder foregår optiske overgange mellem valensbånd (V) og ledningsbånd (C), mens de i atomer og kvantepunkter foregår mellem diskrete energiniveauer (1s, 2s, 2p, etc.). Typiske dimensioner er angivet.

Halvleder kvantepunkter – en ny generation af funktionelle materialer

Halvleder kvantepunkter er nanometer (nm) store krystaller af ét halvledermateriale med et karakteristisk båndgab, der er kohærent (dvs. én-krystallinsk) indlejret i et andet halvledermateriale med et større båndgab. Herved er lednings- og valenselektronernes (hullernes) bevægelser begrænset i alle retninger, og fuldt kvantiseret i lighed med elektroners bevægelser i atomer. Halvleder kvantepunkter kaldes derfor også “kunstige atomer”. På trods af at sådanne kvantepunkter kan indeholde op mod en million atomer, har deres elektroniske og optiske egenskaber ligheder med de tilsvarende egenskaber hos enkeltatomer [1]. Samtidig hermed er kvantepunkterne indlejret i et krystallinsk fast stof, der let lader sig integrere i sædvanlig faststofelektronik og optoelektronik. Denne kombination byder på mange spændende muligheder for at indbygge nye komplekse

funktionaliteter i fremtidens elektroniske og optiske chips [2,3].

Elektronstrukturen er illustreret i figur 1. I et atom er elektronerne bundet til atomkernen via Coulombkraften med en bindingsenergi på flere elektronvolt (13,6 eV i brint) og en atomar diameter på 0,1–0,2 nm. I en typisk halvleder er (næsten) frie elektron-hul par svagt bundet til hinanden via en afskærmet Coulombkraft (nogle få meV) til en exciton med en diameter på 10–20 nm. En sådan exciton er dog ved stuetemperatur ($kT = 26$ meV) normalt dissocieret til et frit elektron-hul par. I et halvleder kvantepunkt derimod er elektroner og huller fanget i en tredimensional potentialbrønd på typisk 100 meV eller mere og med en udstrækning på 1–2 nm. I en normal halvleder sker elektroniske overgange, f.eks. under lysudsendelse, således mellem kontinuums tilstande i henholdsvis valens- og ledningsbånd. Halvleder kvantepunkter derimod ligner atomer derved at overgangene sker mellem diskrete elektrontilstande. Det er denne egenskab, der gør halvleder-kvantepunkter interessante som udgangspunkt for kvanteelektroniske og kvante-optoelektroniske komponenter.

Fremstillingen af tredimensionale halvleder nanostrukturer beror ofte på epitaxiel dyrkning, dvs. fremstilling af krystallinske tynde film med atomar præcision, kombineret med nanolitografi til fremstilling af de laterale strukturer. Kvantepunkter kan også fremstilles på denne måde, men med store omkostninger og begrænset succes. Det er mere hensigtsmæssigt at udnytte selvorganiseringsprocesser og principper under selve den epitaxielle dyrkning, hvorved et stort antal kvantepunkter kan fremstilles på kort tid i en parallel proces. Hvis man f.eks. ved molekylstråle epitaxi (MBE) dyrker InAs på GaAs vil samspillet mellem overfladeenergi og den elastiske energi, der opstår på grund af forskellen i størrelse af In og Ga atomerne, resultere i, at InAs vokser tredimensionalt i små øer i stedet for den sædvanlige todimensionale lag-vækst. Hvis man standser dyrkningen efter en passende tid, vil man kunne observere disse øer som små pyramider på den førhen atomart plane overflade (se figuren på Kvants forside). Hvis man fortsætter med at dyrke GaAs oven på disse øer, vil man få indlejret kvantepunkter af InAs i en matrix af GaAs alt sammen i en velordnet krystalstruktur. Udfordringen ligger nu i at kontrollere dyrkningsprocessen, således at velordnede mønstre af identiske kvantepunkter kan fremstilles til optimering af en given funktionalitet.

Den atomare karakter af sådanne selvorganiserede halvleder kvantepunkter kan undersøges ved optisk spektroskopi – f.eks. fotoluminescens, hvor lys absorberes under dannelse af frie elektron-hul par i barrierematerialet, hvorefter ladningbærerne indfanges i kvantepunkternes potentialbrønde og rekombinerer under udsendelse af lys, der vil være karakteristisk for kvantepunkternes elektronstruktur. Således vil lysets bølgelængde være bestemt af kvantepunktets effektive båndgab, der er øget med kvantiseringsenergiene af

elektron-hul parret, der igen afhænger kraftigt af kvantepunktets størrelse. I en uendelig dyb én-dimensional potentialbrønd er kvantiseringsenergiene således givet ved

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* w^2}; n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

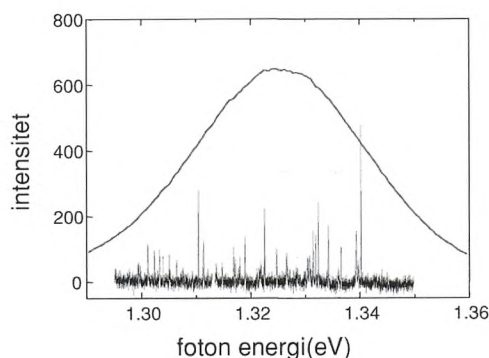
hvor m^* er den effektive masse af elektronen eller hullet, n er et kvantetal og w er bredden af kvantebrønden. Man kan heraf se, at kvantiseringsenergiene bliver af betydning når $w < 10$ nm. Fotoluminescens fra et stort ensemble af kvantepunkter vil indeholde lys af mange forskellige bølgelængder svarende til størrelsesfordelingen af de undersøgte kvantepunkter (se figur 2). Kun hvis man ved nærfeltsmikroskopi isolerer lysudsendelsen fra et enkelt eller nogle få kvantepunkter, vil man direkte kunne observere elektronstrukturen af den enkelte kvantedot.

Da kun nogle få elektroner skal eksciteres for at mætte og invertere den laveste optiske overgang i et kvantepunkt, er kvantepunkter velegnede som udgangspunkt for nye optoelektroniske komponenter. Diodelasere og optiske forstærkere, hvis aktive områder er opbygget af kvantepunkter, fremviser således allerede rekordlave tærskelværdier og giver løfter om at kunne specialdesignes nye komponenter med attraktive funktionelle egenskaber, såsom stor modulationsbåndbredde, lavt effektforbrug og høj temperaturstabilitet [4]. På COM Centret har vi især interesseret os for undersøgelser af ultrahurtige dynamiske forhold i kvantepunktsbaserede optiske forstærkere, f.eks. hvordan forstærkning og brydningsindeks ændrer sig på en (sub)picosekund tidskala, når en intens lyspuls af 100 fs varighed vandrer igennem komponenten ($1\text{ps} = 1000\text{ fs} = 10^{-12}\text{ s}$) [5].

Det faktum, at kvantepunkter kan designes til at indeholde en enkelt eller ganske få kvantiserede elektroner ad gangen kan udnyttes i nye "kvantekomponenter". Hvis et kvantepunkt kun indeholder en enkelt anslået elektron, kan denne elektron ved henfald kun udsende et enkelt lyskvant (foton) ad gangen. Dette kan anvendes til at fremsende kodede signaler, der ikke kan aflyttes uden at modtageren bliver opmærksom på det, såkaldt kvantekryptering. En effektiv enkeltfoton emitter vil kunne fremstilles ved at anbringe et kvantepunkt i en resonant mikrokavitet, hvorved udsendelsesraten af enkeltfotoner vil kunne øges drastisk. Dette er kun et enkelt eksempel på, at vekselvirkningen mellem lys og kvantepunkter kan påvirkes gennem passende design af det omgivende materiale. Ved en periodisk modulering af materialets brydningsindeks, dannelse af fotoniske krystaller, kan lyset lokaliseres der hvor elektronerne er, dvs. i kvantepunkterne, hvorved vekselvirkningen og ulineariteten øges.

En anden potentiel anvendelse af kvantepunkter er som logiske elementer (qubits) i en kvantecomputer [6]. En kvantecomputer udnytter, at et kvantemekanisk toniveau system har uendeligt mange tilstande svarende til alle kohærente superpositioner af de to tilstande.

Kvantepunkter byder på flere mulige realiseringer af sådanne koblede to-niveau systemer enten baseret på elektronens spin eller på ladede elektron-hul par (excitoner). Det springende punkt er at holde systemet kohærent længe nok til at kunne udføre et større antal operationer. Vi har på COM Centret målt kohærenstider af selvorganiserede halvleder kvantepunkter ved hjælp af ulineær spektroskopi i form af foton ekko målinger. Vi har påvist, at ved meget lave temperaturer (0 K) kan excitoner i InAs/GaAs halvleder kvantepunkter holdes kohærente i hele deres levetid, som er ca. et nanosekund [7]. Kohærenstiderne aftager dog drastisk med stigende temperatur og er kun ca. 200 fs ved stuetemperatur [8].



Figur 2. Fotoluminescens fra et stort ensemble af kvantepunkter (øverste kurve), der afspejler størrelsesfordelingen af kvantepunkterne. Nederste kurve viser spektret fra et lille udsnit af kvantepunkterne set gennem en 250 nm stor apertur.

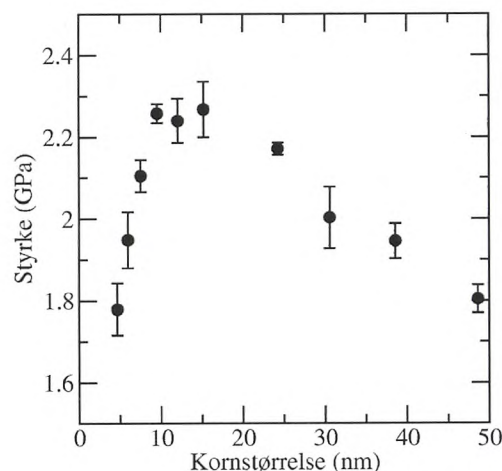
Nanostrukturerede materialer

Man har længe vidst at metallers egenskaber afhænger af deres mikrostruktur, dvs. hvordan metallet er opbygget af mikroskopiske krystaller: Deres form, deres størrelse og deres sammensætning. Man har påvirket metallers mikrostruktur og dermed deres egenskaber siden jernalderen, selvom det naturligvis først var langt senere, at man forstod hvorfor f.eks. glødende jern bliver hærdet, når det dypes i koldt vand. De store fremskridt, der er sket i løbet af det tyvende århundrede skyldes i høj grad, at man er blevet i stand til at kontrollere materialers mikrostruktur. Forhåbentligt vil der ske endnu større fremskridt, når og hvis man kan kontrollere materialernes struktur helt ned til de enkelte atomers placering. Dertil er man, desværre, ikke nået endnu, men med en kombination af avancerede fremstillingsmetoder og computersimuleringer gør man til stadighed nye fremskridt.

En vigtig parameter for et metals egenskaber er kornstørrelsen. Des mindre de enkelte krystalkorn er, jo stærkere bliver metallet – hårdhed og trækstyrke vokser for eksempel med $1/\sqrt{d}$, hvor d er kornstørrelsen. Denne sammenhæng kaldes Hall-Petch relationen. Normalt er kornenes størrelse brøkdele af millimeter, men med specielle teknikker kan man frem-

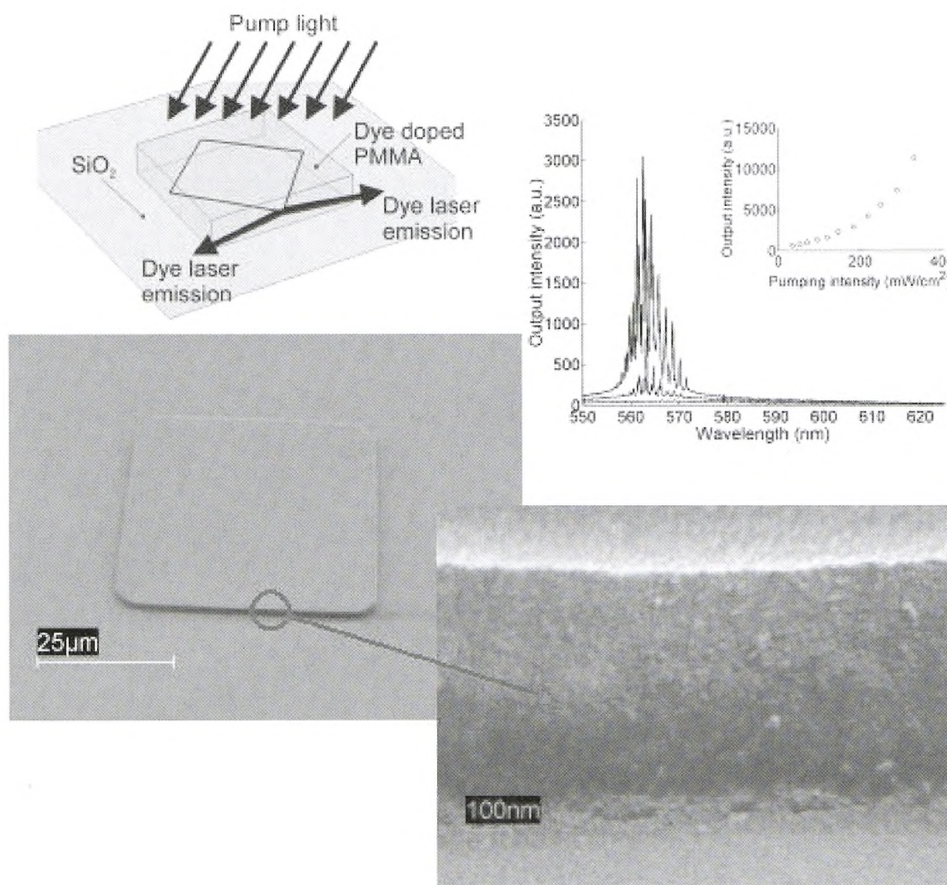
stille metaller med kornstørrelser ned til få nanometer. Ud fra Hall-Petch relationen ville man forvente ekstrem hårdhed i sådanne *nanokrystallinske* metaller. Imidlertid kan man ikke forvente at Hall-Petch relationen bliver ved med at gælde ved så små kornstørrelser, da de gængse teorier forklarer relationen med strukturer, som dannes af defekterne i kornene på længdeskalaer af størrelsesordenen 50 nm eller mere. Under den kornstørrelse ville man derfor ikke forvente at Hall-Petch relationen gjaldt. Eksperimentelle data viser, at hårdheden bliver ved med at vokse, om end lidt langsommere, når kornstørrelsen formindskes under 50 nm; men også at man måske når et maksimum i hårdhed, når kornstørrelsen når ned til ca. 10 nm [9]. Da eksperimenterne er meget vanskelige, og da det endnu dårligt kan lade sig gøre at observere hvad der sker helt nede på atomart niveau, er der brug for computersimuleringer for at forklare eksperimenterne, og måske lære hvordan man kan styre de fænomener, der bestemmer de nanokrystallinske metalleres mekaniske egenskaber.

I 1998–99 lykkedes det os ved CAMP – DTUs center for atomar skala materialefysik – at vise, at ved kornstørrelser under 8 nm gælder Hall-Petch relationen ikke for kobber [10]. I stedet for “normal” deformation, hvor de enkelte krystalkorn ændrer form, så vi næsten udelukkende deformation mellem korngrænserne, idet de enkelte korn gled mod hinanden næsten uden at ændre form. Normalt ville kornene ændre form ved at linieformede defekter i krystallerne, *dislokationer*, bevæger sig igennem kornene. Det er den altdominerende deformationsmekanisme i normale metaller, men i disse ekstreme nanokrystallinske metaller bliver dislokationebewægelsen umulig på grund af den høje tæthed af korngrænser.



Figur 3. Styrken af nanokrystallinsk kobber som funktion af kornstørrelsen.

I 2003, da tilstrækkelig computerkraft var blevet tilgængelig, kunne vi genoptage simuleringerne, men denne gang med kornstørrelser op til 0,1 mikrometer. Det krævede simuleringer med op til 100 millioner



Figur 4. Faststof polymer mikrokavitets farvestoflaser, fremstillet ved hjælp af nanoimprint litografi.

atomer, og 125 computere koblet sammen i en enkelt simulering [11]. Men resultatet udeblev ikke: De simulerede metaller viste sig at have en maksimal styrke, når kornene var mellem 10 og 15 nanometer (figur 3). Under den kritiske kornstørrelse gjorde korngrænsedeformationen metallerne blødere – som allerede vist fem år tidligere. Over den kritiske kornstørrelse er dislokationsbevægelse derimod dominerende. De to forskellige deformationsmekanismer ses i figur 9. I det regime viser simuleringerne en rigdom af processer, som bidrager til at en Hall-Petch relationen gælder (i hvert fald tilnærmelsesvis) helt ned til nær den kritiske kornstørrelse.

Computersimuleringerne har vist, at der er en grænse for hvor hårde nanokrystallinske materialer kan blive blot ved at reducere kornstørrelsen. Ved den kritiske kornstørrelse ses kobber at have en styrke sammenlignelig med ståls normale styrke. Stål kan formentlig også styrkes på lignende måde, om end det må forventes at effekten er mindre dramatisk. Derudover giver computersimuleringerne indsigt i det samspil mellem dislokationer og korngrænser, der bestemmer styrken over den kritiske kornstørrelse.

Nanoimprint litografi

Nanoimprint litografi (NIL) [12] er en parallel proces

med en opløsning bedre end 10 nm. I den parallelle proces defineres alle komponenter samtidigt over et stort areal, ligesom i fotolitografi. Med NIL overføres det ønskede mønster fra et hårdt stempel til en tynd termoplastisk polymerfilm i en stempellignende proces. NIL processen involverer en temperatur-tryk-cyklus i vakuum. Først opvarmes stempel, polymerfilm og substrat, så polymerfilmen bliver flydende. Dernæst presses stemplet ned i polymerfilmen. Temperatur og stempeltryk bibeholdes indtil stemplets hulrum er fyldt med polymer. Herefter afkøles stempel, polymerfilm og substrat til polymeren størkner, og stempeltrykket fjernes. Til sidst fjernes stemplet, og mønstret er dermed overført til den tynde polymerfilm. NIL processen efterlader altid et tyndt lag af polymer, typisk 10–50 nm, de steder hvor der er stemplet. Dette tilbageværende polymerlag fjernes ved hjælp af reaktiv ion-ætsning, hvorefter substratet er blotlagt i de stemplede områder. Polymermønstret kan nu overføres til substratet, f.eks. ved ætsning eller metaldeponering (lift-off). Alternativt kan polymerstrukturene på substratet udgøre de ønskede nanometer-skala komponenter.

På MIC – Institut for Mikro- og Nanoteknologi ved DTU har vi arbejdet med nanoimprint litografi siden begyndelsen af 2003. Som en del af aktiviteterne har vi bygget en NIL pressemaskine. NIL pressemaski-

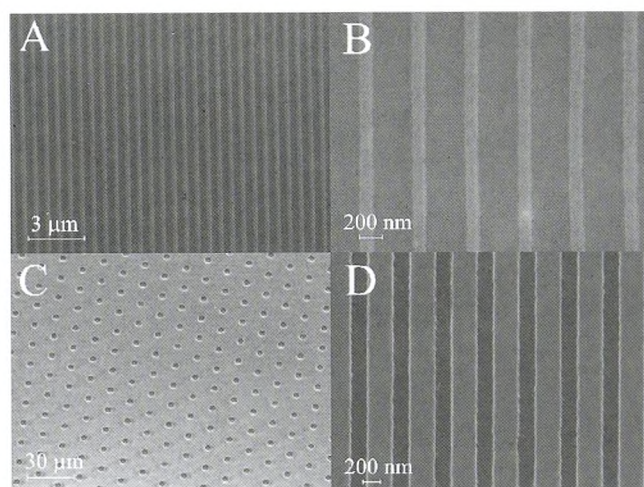
nen består af et vakuumkammer med to planparallelle presseplader, som bevæges pneumatisk. Maskinen kan levere en kraft på 2000 N på pressepladerne, som har en diameter på 10 cm. Pladerne kan varmes op til 240°C, og temperaturen kontrolleres ved hjælp af indbyggede varmelegemer og luft/vand-kølerør. I den nuværende konfiguration, hvor vi trykker ved en temperatur på 170°C–190°C, og separerer stempel og substrat ved 70°C, er procestiden 15–20 minutter. Pressepladernes parallelitet er justeret til at være bedre end 10 mikrometer. Den tilbageværende inhomogenitet i trykkraft over pladernes areal kompenseres ved hjælp af en 5 mm tyk elastisk måtte af Polydimethylsiloxane (PDMS).

NIL aktiviteterne på MIC udsprang af vores forskningsaktiviteter inden for plastikbaserede lasere til laboratorium-på-en-chip mikrosystemer, se [13]. Her er der behov for at formgive optiske mikro-kaviteter i en tynd polymerfilm på et hårdt substrat. På figur 4 vises et eksempel på en faststof polymer farvestof mikro-laser fremstillet ved nanoimprint litografi [14]. Det optisk forstærkende medium i denne laser er farvestoffet Rhodamin 6G, som er opløst i PMMA. Laserresonatoren er baseret på bølgeledning i den 1,5 μm tykke PMMA film kombineret med refleksioner på de lodrette sidevægge. I det aktuelle design er resonatoren formet som en trapez, og lasertilstande understøttes af total intern refleksion på tre af de lodrette sidevægge, medens udkobling finder sted gennem den fjerde væg. På elektronmikroskopbilledet til venstre ses en af de lodrette, reflekterende polymervægge i stor forstørrelse. Ved hjælp af NIL teknikken er det hensigten at videreudvikle denne type lasere med optiske nanostrukturer som kan styre laserens udkobling og emissionsspektrum.

Fremstilling af stempler med nanometer-skala strukturer udgør også en væsentlig udfordring. På MIC har vi fremstillet silicium stempler ved en kombination af fotolitografi, reaktiv ion-ætsning (RIE), termisk oxidation og vådætsning af SiO_2 . Stempelfremspringene har form som mm-lange, 30 nm brede knivsægge. Både RIE processen og vådætsningen er isotrope processer, som virker udglattende, hvorved ruheden af stemplerne kan reduceres til mindre end 5 nm. Disse stempler skal bruges til at fremstille lange, lige væskekanaler med en tværsnitsdiameter under 50 nm. Nano-væskekanalerne kan bruges til at studere væskestrømning i den grænse, hvor væskekanalens tværsnit bliver sammenlignelig med længdeskalaen for de intermolekylære vekselvirkninger i væsken. Nano-væskekanalerne vil også have spændende anvendelser til udstrækning og separation af DNA molekyler. Silicium stemplerne kan også anvendes til at definere tynde metal-elektroder på overfladen af et substrat ved hjælp af metalpådampning og lift-off. Ved lift-off processen deponeres metal i den ønskede tykkelse ovenpå det trykte polymermønster. Herefter dypes substratet i et opløsningsmiddel, som angriber polymeren. Metallet ovenpå polymermønstreet løftes herved af substratet, når

polymeren opløses. Tilbage står et mønster af metal, svarende til åbningerne i polymer mønstret, hvor substratet var blotlagt.

Vi er interesseret i at anvende NIL til fremstilling af optiske komponenter på et laboratorium-på-en-chip. Til dette formål har vi undersøgt en termoplastisk cycloolefin copolymer (COC) med handelsnavnet Topas [15]. Topas er transparent ned til bølgelængder under 300 nm og er kemisk modstandsdygtig overfor bl.a. hydrolyse, syrer og polære organiske opløsningsmidler. Topas markedsføres som materiale til sprøjtestøbning, og vi har undersøgt dets anvendelighed til NIL. I figur 5a og 5b vises elektronmikroskop billeder af 100 nm brede linier, fremstillet ved NIL i Topas. Stemplerne til disse undersøgelser er fremstillet ved hjælp af elektronstrålelitografi og RIE. Stemplerne havde en ruhed på cirka 10 nm, som blev overført til mønstret i Topas. Vi har også demonstreret, at Topas kan fungere som ætsemaske, når det trykte mønster overføres til det underliggende Si substrat vha. en RIE proces, se figur 5c og 5d.



Figur 5. Nanoimprint litografi i en termoplastisk cycloolefin co-polymer (COC), Topas. I panelerne a-c vises elektronmikroskop billeder af mønstre, trykt i en film af Topas på et silicium substrat. I panel d vises stemplet, der er brugt til at frembringe mønstret i a og b.

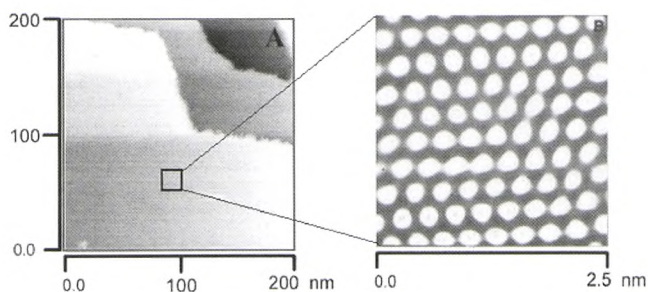
Siden den første demonstration for små 10 år siden er nanoimprint litografi teknikken gennem en række anvendelser ved at blive etableret som et lovende supplement til "Ekstrem Ultraviolet litografi" (EUV) og elektronstrålelitografi. NIL kan dække behovet for en parallel litografiproces til masseproduktion af nanostrukturer i mængder, hvor elektronstrålelitografi er for langsom og metoder som EUV vil være for kostbar. NIL blev i slutningen af 2003 optaget på "International Technology Roadmap for Semiconductors" (ITRS) som en "Next generation lithography" (NGL) til den såkaldte 32 nm node i 2010. Inden for det sidste års tid har blandt andet EU, USA, Japan og Korea igangsat større projekter, for at udvikle NIL fra forskningsstadiet

til en egentlig produktionsteknik. MIC deltager med nanoimprint aktiviteterne i et 4-årigt Integreret Projekt under EU's 6. Rammeprogram, med mere end 30 deltagende akademiske og industrielle partnere.

Kemi og bioteknologi på nanoskala og enkeltmolekyle niveau

Direkte iagttagelse og styring af kemiske og biologiske processer helt ned på det enkelte molekyles niveau er et af kemiens og biokemiens ultimative mål. Nanoskala og enkeltmolekyle kemi er også basis for kommende bioteknologi, f.eks. inden for diagnostik ("biochips"), (bio)analytisk kemi ("biosensorer"), biologisk energiomsætning ("biofuel celler"), såvel som andre områder, generelt indrammet af konceptet "biokemisk overfladevidenskab". Kemi og bioteknologi på nanoskala og enkeltmolekyle niveau er et af Kemisk Instituts fokusområder integreret i NANO•DTU. Nøgleord er: Nanoskala protein- og DNA-struktur og funktion; enkeltmolekyle enzymfunktion; eller proteins og DNA's elektroniske egenskaber og elektrontransport. Indgangsvinkler er bl.a. elektrokemi, spektroskopi og ikke mindst scanning tunnel mikroskopi (STM) udviklet til brug direkte i vandige biologiske medier (*in situ* STM).

Ved registrering af biomolekylers elektriske signaler som fra enzymaktivitet påsættes molekylerne en overflade og bringes i kontakt med f.eks. et elektrokemisk kredsløb. Når vi nærmer os nanoskala dimensioner, er det absolut nødvendigt, at overfladen er af meget høj kvalitet. Figur 6 viser et STM-billede af en elektrokemisk guldoverflade (Au(111)). Overfladen er atomart plan over flere hundrede nanometer. Ved at zoome ind kan strukturopløsningen blive høj nok til, at de enkelte guldatomer bliver synlige direkte i det vandige medium.



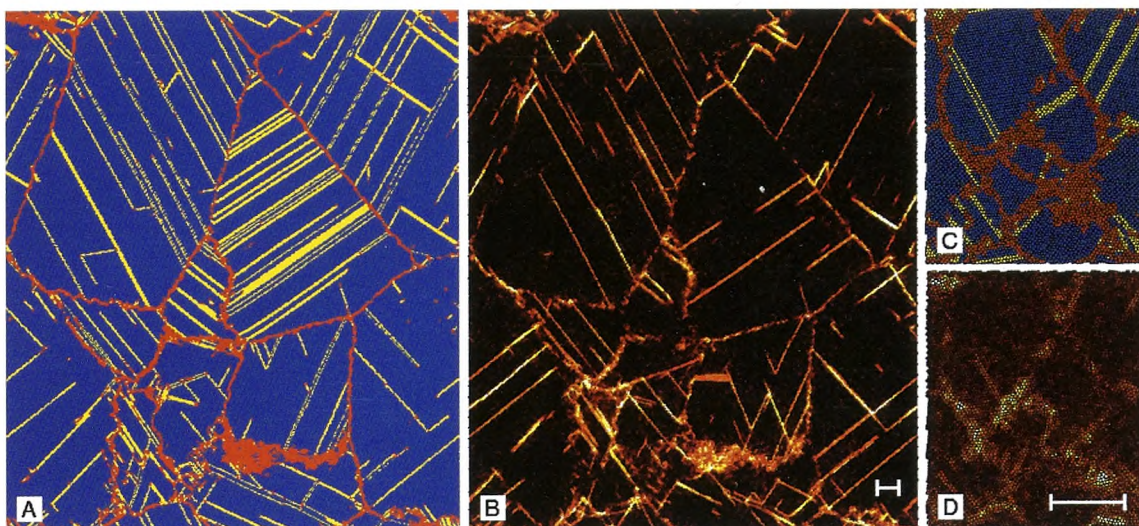
Figur 6. *In situ* STM-billede af en enkeltkrystal Au(111)-overflade i fortyndet perchlorsyre under elektrokemisk kontrol. Kanterne i billedet til venstre er enkeltatom trin i overfladen. Til højre et højopløst billede med Au-atomerne synlige.

Figur 8 viser til venstre et proteinmolekyle, azurin (Az), på den atomart plane Au(111)-overflade, bundet via en disulfidbro. Proteinet indeholder også en kobberion (den orange kugle). Som navnet antyder, hører Az til klassen af blå kobberproteiner. Az er aktør i bakteriell respiration, og strukturen afspejler nogle meget generelle biologiske principper. For det første involverer respiration, fotosyntese, og mange andre biologiske processer *elektrontransport* mellem proteiner som det centrale kemiske reaktionstrin. For det andet indeholder de elektrontransporterende proteiner hyppigt *metalcentre*, baseret på kobber, jern, m.fl., der hjælper til med at transportere elektronerne *igennem* de makromolekylære strukturer.

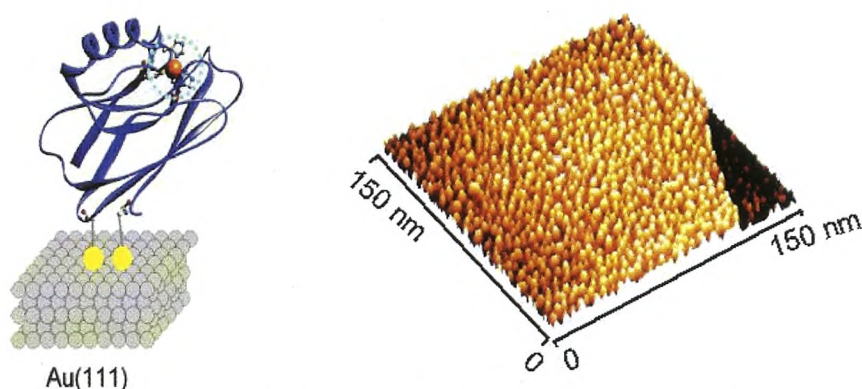
Til højre på figur 8 er vist et STM-billede af Az i vandig opløsning under elektrontransport mellem Au(111)-overfladen og STM-tippen. Proteinet fungerer her efter samme princip som i den naturlige respirationsfunktion. Elektronerne transporteres i begge tilfælde ved *den kvantemekaniske tunneleffekt*. Hver af de lyse pletter er et elektrontransporterende Az-molekyle. Farveskalaen angiver forskellig ledningsevne. Ledningsevnen er højest i molekylets centrale del, hvor Cu-centret befinder sig. Det afspejler Cu-centrets centrale rolle i tunnelmekanismen, hvis teoretiske beskrivelse også er en del af igangværende forskning.

Figur 9 viser to andre eksempler. Øverst til venstre ses et redoxenzym, Cu-nitrit reduktase, CuNiR. Enzymet indgår centralt i kvælstofets globale biologiske kredsløb, hvor det katalyserer reduktion af nitrit, NO_2^- , til nitrogen monoxid, NO. Enzymet indeholder tre subunits, hver med *to* Cu-centre. Elektroner ledes ind ved det ene center, og transporteres ved tunneleffekten *igennem* proteinet til det andet center, hvor NO_2^- reduceres til NO. Nederst til venstre STM under enzymkatalyse. Enzymet modtager elektronerne fra elektroden til efterfølgende nitritreduktion. De lyse strukturer er CuNiR-molekyler i aktion. Øverst til højre et stykke DNA, bundet til Au(111)-overfladen via et svovlholdigt forbindelsesmolekyle. For neden et *in situ* STM-billede, hvor striberne er ordnede geledder af opretstående DNA-fragment molekyler.

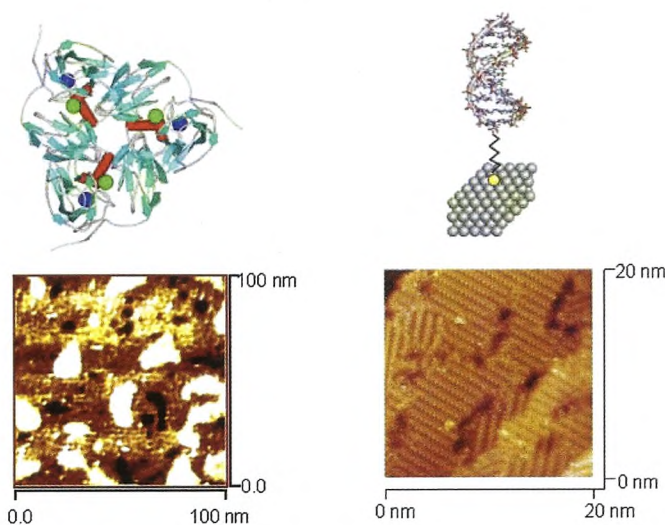
Sådanne resultater viser, at ikke alene elektrontransport, men også enzymkatalyse kan visualiseres på enkeltmolekyleneiveau. Desuden viser de, at DNA-baserede molekyler er elektrisk ledende, noget der for tiden er i intens international fokus. Endelig åbner DNA-billeddannelse mulighed for at følge DNA's kemiske reaktivitet, f.eks. omdannelse mellem enkelt- og dobbeltstreng på enkeltmolekyle niveau. Resultaterne kan føre til, at enzymkatalyse, biosensorfunktion, DNA-screening m.m. kan kontrolleres på det enkelte molekyles niveau, af betydning for kommende udvikling af metalloprotein- og DNA-baserede "biochips" [16, 17].



Figur 7. De forskellige deformationsmekanismer. Figur a viser et snit gennem nanokrystallinsk kobber med en gennemsnitlig kornstørrelse på 100 nm, de røde atomer er i korngrænserne, de gule er defekter i kornene forårsaget af dislokationsbevægelsen, mens de blå atomer stadig sidder i perfekte krystallinske omgivelser. Figur b viser, hvor deformationen sker, idet lysere farver angiver større lokal deformation. Selvom der sker en del deformation i korngrænserne, sker størstedelen i kornenes indre – det er dislokationernes bevægelse man ser. Figur c og d viser det tilsvarende for nanokrystallinsk kobber med kornstørrelse på 7 nm. Her er deformation i korngrænserne dominerende. De hvide linier i b og d er 5 nm lange.



Figur 8. T.v.: Det elektrontransporterende kobberprotein azurin på en atomart plan Au(111)-overflade. Disulfidbroen og Cu-centret er fremhævet. T.h.: *In situ* STM-billede af azurin på Au(111)-overfladen i vandig buffer (ammonium acetat, pH 4,7) under elektrokemisk kontrol. De lyse strukturer viser elektrontransporterende azurinenkeltmolekyler.



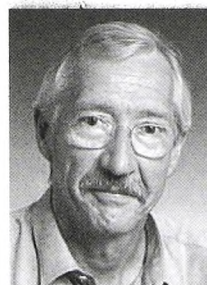
Figur 9. Øverst t.v.: CuNiR's struktur. De blå kugler er Cu-centrene, hvor elektroner ledes ind, de grønne kugler de katalytiske centre. Nederst t.v.: CuNiR i katalytisk aktion på en modificeret Au(111)-overflade. Elektroner ledes ind fra elektroden, og nitrit reduceres ved det katalytiske center. Øverst t.h.: DNA-fragment på Au(111)-overfladen. Nederst t.h.: *In situ* STM af (enkeltstretet) DNA-fragment. De lyse striber viser ordnede geledder af opretstående molekyler.

Referencer:

- [1] M. Bayer, O. Stern, P. Hawrylak, S. Fafard og A. Forchel (2000) "Hidden symmetries in the energy levels of excitonic 'artificial atoms'", *Nature*, bind **405**, side 923–926.
- [2] D. Bimberg, M. Grundmann og N.N. Ledentsov (1999) "Quantum Dot Heterostructures", *J. Wiley & Sons*.
- [3] K. Leosson og J.M. Hvam (2001) "Semiconductor quantum dots for optoelectronics", *DOPS-NYT*, bind **16(2)**, side 30–34.
- [4] D. Bimberg m.fl. (2000) "Quantum dot lasers: breakthrough in optoelectronics", *Thin Solid Films*, bind **367**, side 235–249.
- [5] P. Borri, W. Langbein, J.M. Hvam, F. Heinrichsdorff, M.-H. Mao og D. Bimberg (2000) "Ultrafast gain and index dynamics in InAs-GaAs quantum-dot amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, bind **12**, side 594–596.
- [6] G.L. Snyder m.fl. (1999) "Quantum-dot cellular automata: review and recent experiments", *J. Appl. Phys.*, bind **85**, side 4283–4285.
- [7] D. Birkedal, K. Leosson og J.M. Hvam (2001) "Long lived coherence in self-assembled quantum dots", *Phys. Rev. Lett.*, bind **87**, side 227401–227404.
- [8] P. Borri, W. Langbein, J. Mørk, J.M. Hvam, F. Heinrichsdorff, M.-H. Mao og D. Bimberg (1999) "Dephasing in InAs/GaAs quantum dots", *Phys. Rev. B*, bind **60**, side 7784–7787.
- [9] P. G. Sanders, J. A. Eastman og J. R. Weertman (1997) "Elastic and tensile behavior of nanocrystalline copper and palladium", *Acta Mater.*, bind **45**, side 4019.
- [10] J. Schiøtz, F. D. Di Tolla og K. W. Jacobsen (1998) "Softening of nanocrystalline metals at very small grain sizes", *Nature*, bind **391**, side 561.
- [11] J. Schiøtz og K. W. Jacobsen (2003) "A Maximum in the Strength of Nanocrystalline Copper", *Science*, bind **301**, side 1357.
- [12] S.Y. Chou, P.R. Krauss og P.J. Renssoms (1995) "Imprint of Sub-25 nm Vias and Trenches in Polymer", *Appl. Phys. Lett.*, bind **67**, side 3114.
- [13] S. Balslev, B. Bilenberg, J.P. Kutter og A. Kristensen (2003) "Polymer farvestoflasere til integration i lab-on-a-chip systemer", *KVANT*, bind **14**, nr. 4, side 3.
- [14] D. Nilsson, T. Nielsen og A. Kristensen (2004) "Solid State Micro-cavity Dye Lasers Fabricated by Nanoimprint Lithography", Manuskript indsendt til tidsskrift. Fortryk kan rekvireres hos forfatterne.
- [15] T. Nielsen, D. Nilsson, F. Bundgaard, P. Shi, P. Szabo, O. Geschke og A. Kristensen (2004) "Nanoimprint lithography in the cyclic olefin copolymer, Topas, a highly UV-transparent and chemically resistant thermoplast", Manuskript indsendt til tidsskrift. Fortryk kan rekvireres hos forfatterne.
- [16] J. Zhang, Q. Chi, A.M. Kuznetsov, A.G. Hansen, H. Wackerbarth, H.E.M. Christensen og J.E.T. Andersen (2002) "Electronic Properties of Functional Biomolecules at Metal/Aqueous Solution Interfaces", *J. Phys. Chem. B*, bind **106**, side 1131–1152.
- [17] H. Wackerbarth, M. Grubb, J. Zhang, A.G. Hansen og J. Ulstrup (2004) "Dynamics of Ordered-Domain Formation of DNA-Fragments on Au(111) with Molecular resolution", *Angew. Chem. Int. Ed.*, bind **43**, side 198–203.



Jens K. Nørskov er cand.scient og PhD i fysik fra Århus Universitet og er nu professor ved Institut for fysik, DTU. Han er endvidere leder af CAMP centeret ved DTU og af DTUs samlede nanoteknologisatsning NANO•DTU. Han arbejder med elektronstrukturteori og beregninger for funktionelle nanostrukturer og biomolekyler, specielt med henblik på katalytiske egenskaber.



Jørn M. Hvam er professor og områdeleder ved COM Centret, DTU. Han er desuden leder af rammeprogrammet SCOOP og instrumentcentret NANOS.



Jacob Schiøtz er lektor ved Institut for Fysik ved DTU. Han arbejder med teoretisk materialefysik med fokus på computersimuleringer af metallers egenskaber.



Theodor Nielsen er Cand. Polyt. fra DTU og er Ph.D. studerende på MIC, DTU, hvor han arbejder med nanoimprint litografi.



Anders Kristensen Cand. Scient. og Ph.D. i fysik fra KU, er lektor ved MIC på DTU, hvor han arbejder med nanoimprint litografi og polymerbaserede lasere.



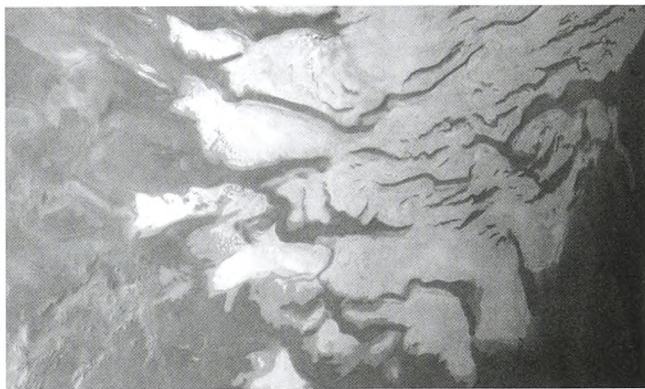
Jens Ulstrup Mag. scient. i kemi fra KU i 1964 og dr. scient. i 1981 også fra KU. Professor i uorganisk kemi ved DTU fra 1984. Har skrevet mange artikler om uorganisk og fysisk kemi, elektrokemi, biofysik, biouorganisk kemi og nanoskala kemi samt flere monografier, senest *Electron Transfer in Chemistry and Biology: An Introduction to the Theory* (Wiley, 1999).

KVANT-nyheder

Michael Cramer Andersen

Vandis på Mars

Den europæiske rumsonde Mars Express fortsætter med at sende resultater fra sit omløb omkring Mars. Den 17. marts bekræftede ESA, at der findes vand i den sydlige polkalot som ellers primært består af kuldioxidis. Den midterste lyse polkalot består af 85% CO₂-is og 15% vandis. Udenfor det centrale område, findes et område med skrænter, der næsten udelukkende består af vandis som falder væk fra det centrale område. Mars Express opdagede også et tredje område med permafrost, dvs. vandis under overfladen, der strækker sig mere end ti km fra skrænterne. Opdagelsen viser, at mængden af vand på planeten er større end hidtil antaget.



Figur 1. Foto af den sydlige polkalot på Mars, taget i en højde af 269 km med højtopløsningskameraet HRSC ombord på Mars Express (ESA).

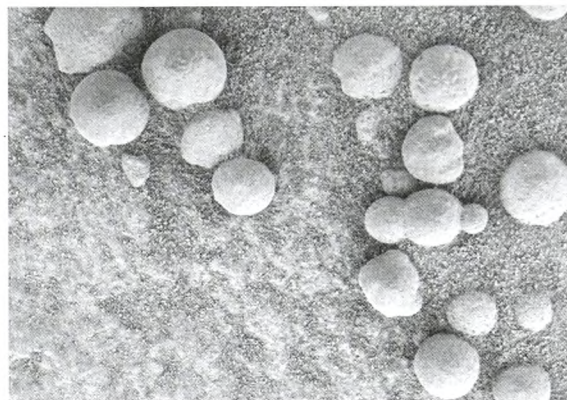
Et andet instrument, "MARSIS", vil fra maj begynde at kortlægge eventuelt vand under overfladen og måle hvor dybt vandisen omkring sydpolen når ned. Derefter kan man beregne hvor meget vandis der er samt afdække hvordan klimaet har forandret sig og om det kan have muliggjort liv.

"Blåbær" og våde klipper på Mars

NASAs Mars-rover Opportunity har fundet sikre tegn på, at klipperne ved landingsstedet Meridiani Planum er dannet ved tilstedeværelse af flydende vand over lang tid. I dag findes vand kun kortvarigt på grund af tryk og temperaturforholdene. Hvis liv skal være opstået på Mars og have udviklet sig, mener de fleste forskere, at flydende vand skal have eksisteret over længere tid, dvs. hundreder af år.

Resultaterne, der blev offentliggjort i marts, består af flere beviser, alle knyttet til Opportunitys landingssted. Opportunity har fundet bølgeformede spor fra stående lavt vand. Mere overbevisende er de mange fund af små kugleformede strukturer over det hele, i alle

dybder af klipperne. Det er udelukket, at de kan være størknet smelte fra meteornedslag (tektitter). Kuglerne er op til 7 mm – på størrelse med blåbær – og indeholder hæmatit.



Figur 2. Kugleformede strukturer på Mars (NASA).

Hæmatit dannes typisk ved tilstedeværelse af vand og med samme krystalstørrelse. Det vigtigste bevis er dog Mössbauer spektret, der viser at alt jern er i oxidationstrinnet Fe³⁺, som er et sikkert tegn på at jernet har været i kontakt med flydende vand. Det meste jern i støv og klipper på Mars sidder ellers i mineralet olivin, som dannes ved meteornedslag men hurtigt *nedbrydes* i vand. Den store mængde jernholdigt støv kunne således tyde på, at der har været vand i flere mia. år, som har nedbrudt jernholdige mineraler til støv og muliggjort dannelsen af f.eks. hæmatit.

Kilder: marsrovers.nasa.gov (18/3 og 23/3); webmineral.com (hematite)

Metan på Mars antyder nylig vulkansk aktivitet

Atmosfæren på Mars består af ca. 95 procent kuldioxid og 5 procent spor af molekyler som ilt, vand, kulmonoxid, formaldehyd og metan. Med Planet Fourier Spektrometret (PFS) ombord på Mars Express, er mængden af metan blevet bestemt til 10 molekyler for hver 1000 mio. (en andel på 10⁻⁸). Det er ikke meget, men når metan kun overlever få hundrede år hvorefter det oxideres og danner vand og kuldioxid, så er der behov for en forklaring på hvor denne lille mængde kommer fra? Flere målinger over hele planeten, skal bestemme gennemsnitsniveauet og om der findes områder med større koncentration. Metan kan dannes af vulkaner og hydrotermiske områder eller måske i atmosfæren. Der er ikke observeret nutidig vulkansk aktivitet, så målingerne kan give et vigtigt fingerpeg om den seneste geologiske aktivitet på Mars.

Kilde: mars.esa.int; pressemeddelelse d. 30/4-04.

Hubbles nye dybeste kig i Universet

Nogle af de dybeste optagelser af unge galakser er foretaget med Hubble Rumteleskopet. I 1995 kom det første "Hubble Deep Field" (HDF), af et område i nærheden af Karlsvognen. Med HDF lærte astronomerne bl.a. at der var flere små galakser med nydannede stjerner end i dag og galakserne kolliderede hyppigt hvorfor mange var irregulære. HDF blev senere fulgt op i andre bølgelængdeområder og suppleret af et felt på den sydlige himmel. Med de mange erfaringer fra det første dybe felt og de stadigt forbedrede instrumenter på rumteleskopet er der derfor naturligt at foretage en ny dyb optagelse. I starten af marts blev dette nye "Hubble Ultra Deep Field", af et område i stjernebilledet Fornax, offentliggjort. Alene eksponeringstiden imponerer: over 1 mio. sekunder – svarende til knap 12 døgn!



Figur 3. Udsnit (ca. 1/8) af Hubbles nye dybe felt (NASA/ESA).

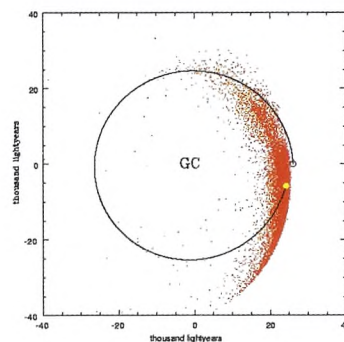
Hubble Ultra Deep Field rummer i alt ca. 10 tusinde galakser. Ud over billedet i synligt lys, optaget med Advanced Camera for Survey, er der optaget et billede i nærinfrarødt lys med NICMOS-instrumentet. De svageste galakser stammer fra den såkaldte "mørke periode", kort tid efter big bang, hvor de første stjerner opvarmede og oplyste det ellers mørke og kolde univers. Ved at kombinere observationer i synligt og nærinfrarødt lys forsøger forskerne, at observere galakser med en rødforskydning på mellem 7–12, svarende til at Universet var mellem 400–800 mio. år, for at besvare spørgsmålet om Universet så ud på samme måde i denne periode som da det var 1–2 mia. år. Hubble Ultra Deep Field giver et billede af det langt mere kaotiske unge univers. I udsnittet på figur 3 ses flere af de små røde og meget fjerne unge galakser.

Kilde: www.spacetelescope.org, pressemed. d. 9/3-04.

Mælkevejen mere turbulent end hidtil antaget

Resultatet af 1001 nats observationer af udvalgte stjerner i vores galakse Mælkevejen har ændret vores billede af en galakse, der roterer stille og roligt med stjerner, der bevæger sig i næsten cirkelformede baner. Forskerholdet, der består af astronomer fra Danmark, Schweiz og Sverige, har observeret radialhastigheder og Strömghren-fotometri for mere end 14.000 solliggende stjerner igennem 15 år. Projektet blev startet af Bengt Strömghren, der udviklede et farvesystem,

som gør det muligt at bestemme mange stjerners kemiske sammensætning og alder relativt hurtigt. Sammen med afstande og egenbevægelser fra Hipparcos-satellitten giver observationsmaterialet det hidtil mest komplette grundlag for studier af Mælkevejens kemiske og dynamiske udvikling. Strömghrens drøm om at tilvejebringe omfattende systematiske observationer af Mælkevejens stjerner for bedre at forstå galaksens udvikling er nu fuldendt efter mere end to årtier.



Figur 4. Den gule plet markerer Solens position på en cirkelbane omkring galaksens centrum (GC). Stjernerne (røde prikker) bevæger sig med uret og observeres i dag indenfor den lille ring. For ca. én omgang siden var de langt mere spredt så stjernerne følges ikke ad (ESO og A&A).

Solens bane er næsten cirkelformet, men beregner man banerne for de 14.000 stjerner tegner der sig et andet og mere kaotisk billede. Stjernerne, som i dag befinder sig tæt på Solen, kommer fra et større område i galaksen og har været udsat for adskillige påvirkninger, som har ændret deres baner. Jo ældre stjernerne er, jo større er deres tilfældige hastigheder. Stjernerne kolliderer ikke ligefrem, men de udsættes for gentagne stød, primært fra store gasskyer og spiralarmene, men muligvis også fra sorte huller og en bjælke i centrum af galaksen. Observationer af stjernernes metalindhold tyder også på en mere livlig galakse end ellers antaget, hvor supernovaeksplosioner, galaksekollisioner og indfaldende gasskyer har spillet en vigtig rolle i galaksens udvikling.

Kilde: ESO pressemed. 8/4-04, www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2004/pr-08-04.html

Mere effektive solceller med nanopartikler

I en solcelle, opbygget af halvledede, skaber en indkommende foton fra Solen (med den rette energi) normalt ét elektron-hul par og lidt varme. Ved meget lys kan der løbe en strøm. Effektiviteten af solceller kan nu forbedres betragteligt idet forskere fra Los Alamos har fundet ud af, at nanopartikler (mindre end 10 nm) af bly og selen kan skabe et ekstra elektron-hul par i stedet for den energi der går tabt som varme. Forskerne forventer, at solceller, hvor nanokrystaller af PbSe er implementeret, vil kunne omdanne lys til strøm med 35% større effektivitet.

Kilde: AIP Physics News 681 13/4-04, newton.ex.ac.uk/aip/

Gamma astronomi med INTEGRAL

Niels Lund, Dansk Rumforskningsinstitut.

Vi ser skarpere nu ...

Med opsendelsen af den Europæiske INTEGRAL satellit i oktober 2002 har astronomerne fået et fantastisk nyt redskab i hænderne til at studere kompakte objekter overalt i Universet. Men ikke nok med det, INTEGRAL medbringer også det bedste og mest nøjagtige spektrometer med hvilket fordelingen af radioaktive grundstoffer i vores galakse kan kortlægges [1].

Det er ikke længere nogen nyhed at moderne astronomi betjener sig af observationer i alle dele af det elektromagnetiske spektrum – fra radio- til gamma-kvanter. Det brede spektrum af bølgelængder – op mod 20 dekaner – gør det muligt at studere himlens objekter på mange skalaer i temperatur, tryk, magnetfelt, udstrækning ...

Men nogle områder af det elektromagnetiske spektrum byder på større udfordringer end andre når opgaven er at konstruere en god kikkert, et godt kamera eller en god spektrograf.

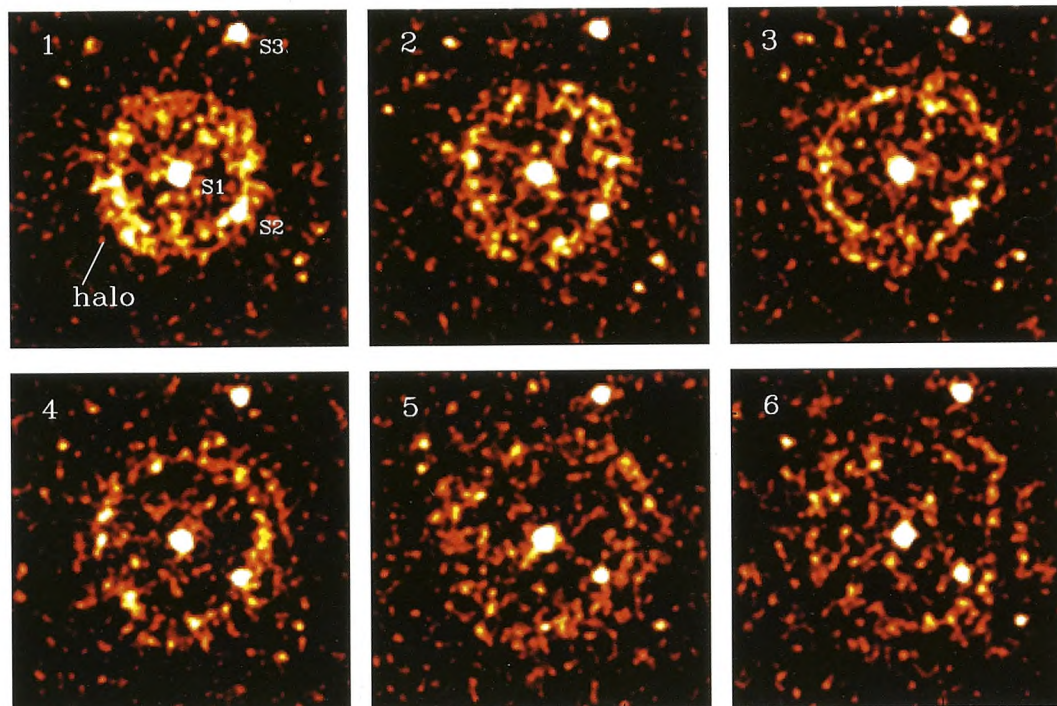
Hård Røntgenstråling og lavenergi gammastråling i energiområdet mellem 10 keV og 30 MeV er et sådan vanskeligt område. Røntgenspejle fungerer fint for energier under 10 keV, men bliver hurtigt ineffektive ved højere energier. Og gammakvanternes store gennemtrængningsevne – som netop betinger gamma-



Figur 1. INTEGRAL-satellitten medfører to hovedinstrumenter til gamma-astronomi. Dertil kommer et sæt af mindre Røntgenteleskoper og en optisk monitor. Alle Røntgen- og gammainstrumenter benytter de såkaldte "kodede masker" til at tage billeder af gammakilderne på himlen.

områdets anvendelighed til studier af objekter som i synligt lys er skjult bag støv- og gasskyer – gør det vanskeligt at bygge effektive detektorer, og også vanskeligt at afskærme og definere detektorernes synsfelt.

Vores kendskab til Universets udstråling i et dette vanskelige bånd har derfor indtil for nyligt været man-



Figur 2. De ekspanderende "røgringe" omkring eftergløden fra et gammaglimt er en optisk illusion fremkaldt af det meget kortvarige og intense lysglimt der ledsager selve gammaglimtet. Man kan forestille sig det korte lysglimt som et antal tynde skaller af lys, der udvider sig i rummet. Der hvor skallerne skærer igennem nogle tynde støvlag i vore Mælkevej ser vi en ring hvis diameter vokser med tiden.

gelfuld. Med simple, instrumenter – blot afskærmet for at begrænse synsfeltet til nogle få kvadratgrader – har vi kunnet studere nogle få af de allerstærkeste kilder på himlen, og vores forståelse af kildernes natur har derfor i mange tilfælde været rudimentær.

Men med INTEGRAL flytter grænserne for de gennemførlige observationer sig dramatisk. Vi kan nu stille skarpt på gamma-kilderne både i retning og i energi. I det følgende vil INTEGRALs instrumenter og nogle eksempler på de nye resultater blive gennemgået.

Instrumenterne på INTEGRAL

INTEGRAL medbringer fire instrumenter: to store gammastrålings instrumenter og to mindre monitorinstrumenter, et til Røntgenstråling og et optisk kamera.

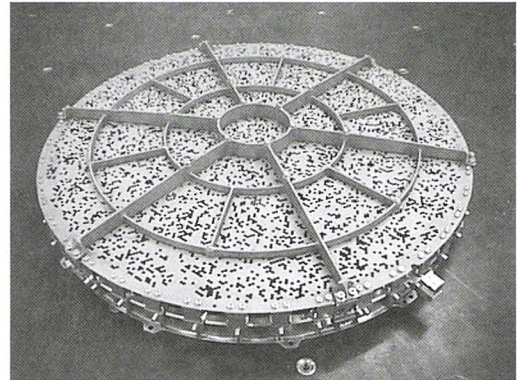
Gamma-spektrometeret, SPI, er det tungeste af de fire instrumenter og tegner sig med sine 1300 kg alene for godt 60 % af den samlede payloadvægt. SPI indeholder 19 store germaniumdetektorer kølet til ca. 90°K. Den spektrale opløsningsevne af disse detektorer er ca. 2 keV ved 511 keV og denne opløsningsevne vedligeholdes ved halvårslige annealingprocesser. SPI dækker et bredt energinterval, fra ca. 20 keV og op til 8 MeV [2].

Det andet store instrument på INTEGRAL er "imager"-instrumentet, IBIS, som optager 35 % af payloadvægten. IBIS indeholder mere end 16.000 halvlederdetektorer baseret på cadmium-tellurid krystaller, disse detektorer kan, i modsætning til SPI's germaniumkrystaller, arbejde ved stuetemperatur og stadig præstere en særdeles god spektralopløsning. De mange detektorpixels giver IBIS et usædvanligt skarpt "syn" i det energiområde mellem 15 og 500 keV, som dækkes af CdTe-krystallerne. IBIS har også en højenergisektion med 4000 CsI-krystaller, disse dækker energintervallet mellem 300 keV og 10 MeV. Desværre er denne del af instrumentet plaget af en meget høj baggrund og har ikke helt kunnet leve op til forventningerne. Men dette forhold er kompenseret i kraft af de meget velfungerende CdTe-krystaller [3,4].

Endelig er der de to monitorinstrumenter som må deles om de resterende 4 % af payloadvægten. Røntgenmonitoren, JEM-X, påkalder sig særlig interesse her i landet fordi instrumentet er udviklet i Danmark. Dansk Rumforskningsinstitut har stået i spidsen for et stort konsortium, der i fællesskab har bygget instrumentet og udviklet tilhørende software. JEM-X er følsom i intervallet mellem 3 og 35 keV. Detektoren er en gasfyldt billedetektor af ny konstruktion med 50.000 pixels [5-7]. Den optiske monitor er bygget i Spanien og den betjener sig af en CCD-detektor med en million pixels [8].

Alle de tre "højenergi-instrumenter", SPI, IBIS og JEM-X, benytter sig af "kodede" masker til at skabe billeder af Røntgen- og gammahimlen. Spejle og linser har ingen effekt på hård Røntgen- og gammastråling. Så hulkameraet er en af de få resterende muligheder –

og et "kodet-maske-kamera" er et avanceret hulkamera med mange huller for at opnå høj følsomhed. JEM-X masken, som er den mest komplekse har mere end 24.000 huller arrangeret i et velovervejede mønster, som på en gang sikrer gennemsnitlig ensartethed og maksimal variation af mønsterets detaljer mellem forskellige områder af masken.



Figur 3. Den kodede maske der anvendes i det danske JEM-X instrument på INTEGRAL. Masken består af godt 24.000 sekskantelementer hvoraf ca. 25% er åbne. Hvert element har en diameter på ca. 3,5 mm.

Resultater fra INTEGRAL missionens første år

Et af de vigtigste resultater fra det første års observationer er opdagelsen af en hidtil ukendt klasse af højenergiobjekter i vores Mælkevej. Det drejer sig tilsyneladende om dobbeltstjernesystemer bestående af en kæmpestjerne med en usædvanlig kraftig "stjernevind" og en neutronstjerne i kredsløb om hinanden. Den kraftige stjernevind giver neutronstjernen gode muligheder for at opsuge nyt stof, og i denne proces opstår en kraftig Røntgenstråling. På trods af dette er disse systemer hidtil blevet overset, fordi det allermeste af Røntgenstrålingen er blevet absorberet af gas og støv i kæmpestjernens vind. Kun ved energier over 20 keV kan strålingen begynde at trænge igennem, og ved disse energier har spejteleskoperne næsten ingen følsomhed længere [9].

Opdagelsen af disse "indhyllede" kilder har på en naturlig måde givet forklaringen på et gammelt mysterium: oprindelsen af den hårde røntgenstråling fra vores galakse. Tidlige instrumenter til studiet af den hårde Røntgenstråling (energier over 20 keV) har tydeligt kunnet registrere stråling i dette energiområde fra galaksens plan men kunne ikke afgøre om strålingen var diffus i sin oprindelse (altså opstod i rummet mellem stjernerne) eller den var knyttet til et stort antal relativt svage punktkilder. For den diffuse model talte at eksistensen af diffus stråling allerede var veletableret både ved lavere (< 10 keV) og ved højere (> 100 keV). Imod talte at de mekanismer, der kunne skabe diffus stråling under 10 eller over 100 keV ikke var effektive i mellemenergiebåndet. En punktkildemodell havde ikke den slags vanskeligheder – men der var tilsyneladende bare ikke nok punktkilder til at forklare den samlede

udstråling fra Galaksen. Med opdagelsen af de "indhyllede" kilder falder brikkerne på plads, disse udstråler netop i mellemenergiebåndet og har hidtil været overset [10].

Et meget aktivt forskningsfelt, også i Danmark, er studiet af de kosmiske gammaglimt. Dette er meget intense sekund- til minutlange glimt af hård Røntgen og gammastråling, der observeres kommende fra tilsyneladende tilfældige punkter på himlen. Glimtene forekommer ret sjældent – et meget følsomt instrument med frit udsyn til hele himlen ville måske se et eller to glimt om dagen. Det, der gør gamma-glimt så interessant, er opdagelsen af at de stammer fra umådeligt fjerne galakser, de signalerer de voldsomste eksplosioner vi endnu har observeret, og de fysiske processer der må udspille sig i disse eksplosioner foregår under forhold som vi ikke kender til noget andet sted i Universet. Lægger man dertil, at de stjerner, der eksploderer, er de ældste enkeltstjerner vi har mulighed for at observere (fra disse afstande kan vi ellers kun se det samlede lysskær fra milliarder af stjerner i en hel galakse), og desuden at lysglimtet fra eksplosionen har gennemlyst det meste af Universet og bærer på oplysninger om grundstofferne i gasskyerne på vejen, så vil man forstå at gammaglimt både er et fascinerende mysterium – og et herligt værktøj.

INTEGRAL var oprindeligt slet ikke tænkt som en mission til at studere gammaglimt. Faktisk var projektet langt inde i byggefasen da det i 1997 for første gang blev erkendt at gammaglimt også var ledsaget af (meget svage) lysglimt. Ikke blot er lysglimtene så svage at de normalt overses i stjernemylderet, men de dør også bort i løbet af få timer eller dage. Så en præcis position på himlen og en meget hurtig reaktion på Jorden er alfa og omega i disse studier. Og ved den første nøgleparameter: en øjeblikkelig bestemmelse af glimtets position på himlen har INTEGRAL sin styrke. I modsætning til de fleste andre satellitter har INTEGRAL ikke en båndoptager om bord som lagrer målingerne indtil satellitten passerer over en modtagestation. INTEGRAL går i en meget elliptisk bane, og den kan altid sende sine data direkte til modtagestationerne i Belgien og i USA. Så observationerne er tilgængelige i analysecenteret i Geneve indenfor et sekund fra deres registrering på satellitten. INTEGRAL har i dag ubestridt rekorden for præcision og hurtighed i forhold til gammaglimt. Desværre er raten af glimt indenfor INTEGRAL's begrænsede synsfelt meget lav – ca. 10 glimt om året, men kvaliteten af data er høj og der er store forventninger til at den rigtige kombination af glimtets position, kikkerternes tilgængelighed og de lokale meteorologiske forhold vil tillade at fange et lysglimt tidligt i forløbet, med en stor kikkert udstyret med en god spektrograf [11].

En overraskende observation, der fint illustrerer at gammaglimt kan udnyttes som "værktøj" i helt andre områder af astrofysikken er observationen af en hurtigt voksende "røgring" omkring et gammaglimt observeret i et samarbejde mellem INTEGRAL og den anden stor

ESA satellit, XMM, i december 2003. "Røgringen" viste sig at være Røntgenstråling som var spredt ved passagen gennem nogle store støvskyer i vores Galakse. Observationen gjorde det muligt at bestemme mængden af støv i skyen og afstanden til skyen meget nøjagtigt [12].

Fremtidsperspektiver

INTEGRAL missionen vil fortsætte i endnu mindst fire år. Vi forventer i løbet af denne tid at observere et antal voldsomme udbrud af Røntgen- og gammastråling fra dobbeltstjernesystemer med sorte huller i vores Mælkevej. Den slags udbrud forekomme typisk en gang om året – så vi føler allerede at det er på høje tid at det næste kommer. Det vil her være af særlig interesse at udnytte SPI instrumentets enestående energiopløsning til at foretage præcise målinger af de nydannede radioaktive elementer vi forventer vil spredes i rummet i forbindelse med et sådan udbrud. SPI instrumentet er også i gang med en detaljeret kortlægning af langtlivende radioaktive stoffer der er spredt rundt i Mælkevejen som resultat af nova- og supernovaeksplosioner gennem den sidste million år. Resultaterne af disse undersøgelser kan først ventes om nogle år. Men vi regner med at gammaglimt og andre mere kortvarige fyrværkeriepisoder vil holde os godt beskæftiget indtil da. Og for det længere perspektiv arbejdes der, også på Dansk Rumforskningsinstitut med nye generationer af følsomme teleskoper og detektorer til studiet af højenergiuniverset.

Referencer:

- [1] Winkler m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L1.
- [2] Vedrenne m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L63.
- [3] Ubertini m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L131.
- [4] Lebrun m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L141.
- [5] Lund m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L231.
- [6] Budtz-Jørgensen m.fl. (2004) *Proc. of SPIE*, bind **5165**, side 139.
- [7] Brandt m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L243.
- [8] Mas-Hesse m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L261.
- [9] Walter m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L427.
- [10] Lebrun m.fl. (2004) *Nature*, bind **428**, side 293.
- [11] Mereghetti m.fl. (2003) *A&A*, bind **411**, side L291.
- [12] Vaughan m.fl. (2004) *Ap.J.*, bind **603**, side L5.

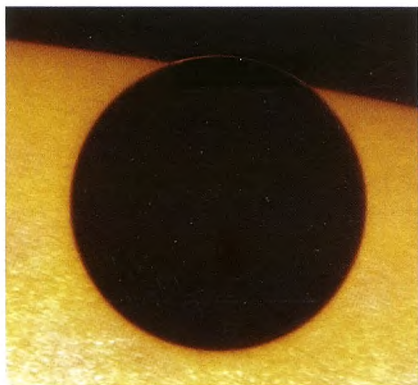


Niels Lund er afdelingsleder på Dansk Rumforskningsinstitut. Han har beskæftiget sig med højenergi-astrofysik siden 1963 og har arbejdet med instrumentudvikling til både amerikanske, russiske og europæiske satellitter. Har specielt interesseret sig for oprindelsen af den kosmiske partikkelstråling og af de kosmiske gammaglimt.

Venuspassagen den 8. juni 2004

Camilla Bacher, medlem af Kvants redaktion.

Den 8. juni var vi fra Danmark vidner til et af naturens sjældnere fænomener, nemlig en Venuspassage. Sidste gang en Venuspassage fandt sted var i 1882, så ingen nulevende mennesker havde set det før, og der eksisterede kun få, dårlige fotografier af den seneste begivenhed. Forventningen blandt astronomi-interesserede var da også tårnhøj, og heldigvis var vejret godt over det ganske land, så disse forventninger kunne indfries. I løbet af de godt seks timer Venuspassagen varede, vendte rigtig mange øjet mod himlen og fik set et herligt syn af Venus, der som en kulsort silhuet passerede hen foran solskiven.



Figur 1. Sollys brydes i Venus' atmosfære. Foto: Det svenske 1-meter solteleskop på La Palma.

De seneste år har vi været begunstiget af mange fantastiske himmelskuer, fra lysklare kometer som Hyakutake og Hale-Bopp, til storme af stjernes kud og selvfølgelig sidste års Merkurpassage. I forhold til Merkurpassagen var Venuspassagen helt i særklasse. Ikke alene fordi den er langt mere sjælden, men Venus er både tættere på Jorden og fysisk større end Merkur, så Venus kunne man se med det blotte øje. Mange havde fundet svejseglass eller solformørkelsesbriller frem, og synet af Venus som en cirkelrund, kulsort og forholdsvis stor plet på Solen var det, der gjorde størst indtryk på mange denne morgen.

Venuspassagen var et flot syn, men den har ikke umiddelbare anvendelser i moderne astrofysik. Tidligere var der forsøg på at bruge passageerne til at

beregne størrelsen af "den astronomiske enhed", afstanden mellem Jorden og Solen. Edmond Halley, mest kendt for sin komet, viste i 1716, hvorledes man kan benytte Venuspassager til at beregne afstanden mellem Solen og Jorden, ved hjælp af hvilken afstandsskalaen i solsystemet kan fastlægges via Keplers 3. lov. Den grundlæggende ide var parallakse-måling: Når Venus bevæger sig henover solskiven, ses den under lidt forskellige vinkler i afhængighed af den geografiske position. Vinkelforskellen bestemmes ved måling af varighederne af passagen. Ideen var god, men det viste sig, at usikkerheder i de enkelte målinger var forholdsvis store, så værdien af resultaterne var begrænsede, da denne metode første gang forsøgt i 1761. Et stort projekt koordineret af ESO (www.vt-2004.org) havde til formål at samle observationer af Venuspassagen med det formål at gentage disse målinger. Således blev det fascinerende himmelskue også en anledning til at formidle naturvidenskab til en bred gruppe af skoleelever.



Figur 2. Venus ses som silhuet mod Solen. Foto: Claus Nissen med en 10 cm Vixen linsekikkert.

Gik du glip af himmelshowet den 8. juni, er chancen der igen den 6. juni 2012, men da kan vi fra Danmark kun observere den sidste del af Venuspassagen. Herefter kommer næste par af Venuspassager i 2117 og 2125, og her lover Kvants redaktion naturligvis også at være på banen med en beretning.