

Nanoteknologi

*- på vej mod en ny
industriel revolution*

Nanoteknologi vil i fremtiden blive anvendt til at udvikle nye materialer, der både er stærke og modstandsdygtige mod påvirkninger som snævs eller ridser. Biler vil kunne kolliderer som radiobiler, og bygninger vil blot vibrere under et jordskælv.

*Af ph.d. studerende
Kresten Egeblad og
professor Claus Hviid Christensen*



Nanoteknologi og nanoscience er helt store trends inden for naturvidenskabelig og teknisk-videnskabelig forskning. Det skyldes først og fremmest to ting: De mange potentielle anvendelsesmuligheder for nanoteknologi samt det faktum, at naturvidenskab i nanoskala har vist sig at give anledning til en række nye og spændende fænomener. Det mest fantastiske er dog, at den naturlige størrelsesorden for væsentlige dele af de traditionelle naturvidenskaber netop er nanometerskala, dvs. fra ca. 0,1 til 100 nm. Dette gælder selvfølgelig i udpræget grad for kemi, men også for flere underområder af fysik og biologi.

Det er netop den fælles base mellem kemi, fysik og biologi der gør, at man forventer innovation og en række revolutionerende opfindelser i samspillet mellem de traditionelle fag. Forventningerne kunne næppe blive større: I USA søsatte daværende præsident Bill Clinton i 1998 det amerikanske National Nanotechnology Initiative med ordene "Nanotechnology will form basis for the next industrial revolution".

Perspektiverne for nanoteknologi er vidtrækkende: I de næste par år forventer man at se

næste generation af solceller, nye materialer til køling og helt nye muligheder for avanceret medicinering, f.eks. ved at et implantat, som er opereret ind i et menneske, selv sørger for at administrere et eller flere medikamenter til patienten. Men hvorfor er nanoteknologi blevet så interessant?

Faktisk har nanoteknologien allerede fundet vej til en række industrier. Specielt i elektronikindustrien, hvor de nyeste displayapplikationer er baseret på OLEDs (Organic Light Emitting Diodes) og anvendes i bl.a. mobiltelefoner, digitalkameraer og bærbare computere. I den traditionelle kemiske industri har heterogene katalysatorer i nanostørrelse gennem en årrække indtaget en central rolle. Men også mindre oplagte brancher, f.eks. tekstilindustrien, har taget nanoteknologien til sig, og det er nu muligt at fremstille tøj, der er fuldstændigt vandafvisende eller meget lidt brændbart.

Det er ikke kun i videnskabelig sammenhæng, at "nano" er blevet det helt store buzz-word. Hollywood har i film som Terminator 3, Minority Report og Spiderman I og II behandlet emnet, og for nylig er også computer-spilbranchen kommet med på nanobølgen,

eksempelvis med spillet Nanobreaker, hvor nanorobotter har forvandlet mennesker til monstre.

Men hvad er nanoteknologi egentlig? Hvad er det nye, hvorfor er det så interessant, og hvilke muligheder har kemien i den nye nanoverden? I det følgende forsøges disse spørgsmål besvaret ved at vi beskriver nogle af de mange gennembrud, der har bragt nanoteknologien fra science fiction til en stadig større del af vores hverdag.

Indblik i nanoverdenen: Scanning probe mikroskopi

I starten af 1980'erne udviklede fysikerne Gerd Binnig og Heinrich Rohrer fra IBM's forskningslaboratorier i Zürich en helt ny mikroskopiteknik kaldet scanning tunnel mikroskopi (STM). Denne revolutionerende opfindelse gjorde det muligt at studere overflader af ledende materialer, som f.eks. metaller, med en hidtil uset detaljeringsgrad. For dette modtog de i 1986 Nobelprisen i fysik sammen med Ernst Ruska, der fik prisen for sit arbejde med elektronoptik og udviklingen af det første elektronmikroskop i 1930'erne. Siden er en række

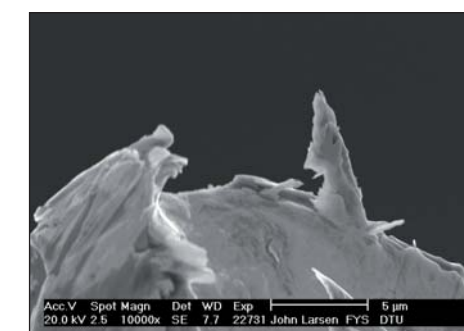
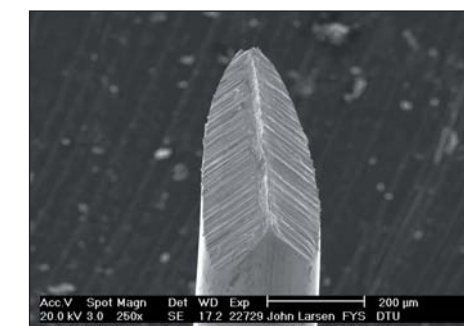
beslægtede former for mikroskopi udviklet, f.eks. atomic force mikroskopi (AFM) og scanning elektronmikroskopi (SEM). Denne familie af mikroskoper går samlet under betegnelsen scanning probe mikroskoper (SPM).

I SPM bevæges en probe henover en prøves overflade. Undervejs foretager proben et antal målinger. De enkelte målinger konverteres derpå til billedpunkter, således at det endelige mikroskopi-billede er opbygget af billedpunkter. Hermed adskiller SPM sig fra optiske mikroskoper, hvor hele billedet dannes på en gang ved forstørrelse gennem en eller flere linser. I de følgende bokse nedenfor er der yderligere information om de forskellige metoder under fællesbetegnelsen SPM.

I et STM er de to elektroder (se boks) henholdsvis proben og prøven, mens det isolerende medium normalt er vakuum eller luft. Da prøven skal fungere som den ene elektrode, er det med mikroskopet derfor en forudsætning, at prøven er et elektrisk ledende materiale. Som probe i et STM anvender man en meget spids metalnål, der er så spids, at kun ganske få atomer rager længere ud end resten. Dette er uhyre vigtigt, fordi tunnelstrømstyrken afhænger eksponentielt af den afstand, en elektron skal tunnelere. Ændres afstanden bare 0,1 nm vil tunnelstrømmen ændres med en faktor 10. Således vil et enkelt atom, der rager 0,1 nm længere ud end de andre, komme til at bære 90 % af tunnelstrømmen. Et billede af en STM-probe, som dem vi bruger på DTU, ses i nedenstående figur.

Scanning tunnel mikroskopet

Scanning tunnel mikroskopet (STM) virker ved at udnytte *tunneleffekten*, som er et kvantemekanisk fænomen uden sidestykke i den klassiske fysik. Tunneleffekten tillader, at en meget svag strøm kan løbe mellem to elektroder, der er adskilt af et isolerende medium. Man siger, at elektronerne *tunnelere* fra den ene elektrode til den anden. Denne meget svage strøm, kaldet tunnelstrømmen, kan løbe mellem elektroderne, fordi elektroner ifølge kvantemekanikken har en vis sandsynlighed for at befinde sig uden for selve elektroden. Er elektroderne direkte forbundet eller i kontakt med hinanden gennem et elektrisk ledende medium, f.eks. en vandig opløsning, vil der naturligvis kunne løbe en strøm mellem dem. Denne strøm vil dog være af en væsentlig højere størrelsesorden og vil i øvrigt være mulig at beskrive med klassisk fysik (læs mere om STM i kapitlet: "Kemi og bioteknologi på nanoskala – og enkeltmolekyleniveau").

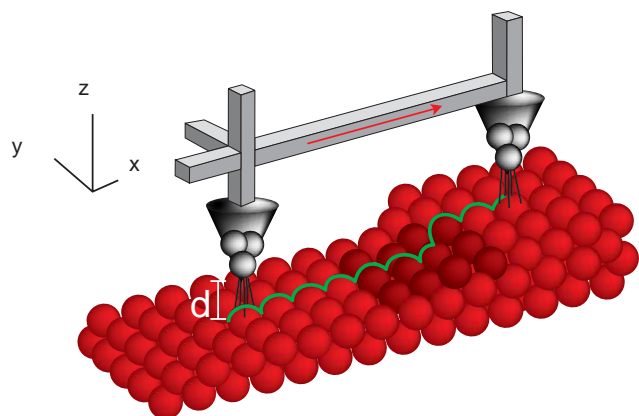


Scanning elektronmikroskopibilleder af en Pt/Ir probespids som dem vi bruger i vores scanning tunnel mikroskop. Nederst ses spidsen af proben med meget høj forstørrelse, bemærk hvor uregelmæssig probespidsen er.



Artiklens forfattere ph.d. studerende Kresten Egeblad (tv) og professor Claus Hvuid Christensen.

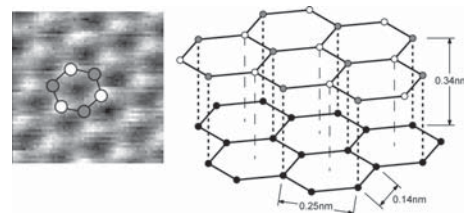
Da tunnelstrømstyrken afhænger eksponentielt af afstanden mellem elektroderne, skal afstanden mellem disse være ganske kort. Normalt holdes afstanden under ca. 1 nm og tunnelstrømmen i størrelsesordenen 1 nA. Spændingsforskellen mellem probe og prøve holdes på ca. 0,1 V. Da der skal opretholdes en spændingsforskel mellem probe og prøve, er det kun muligt at måle på prøver, der er elektrisk ledende. Når proben scannes (x- og y-retninger) henover overfladen ved at fastholde tunnelstrømstyrken, vil proben bevæge sig i forhold til overfladen i z-retningen. Det er denne bevægelse, der registreres af instrumentet. Nedenstående figur viser en probe, der bevæges over et trin på en overflade.



Skematisk illustration af en probe der scannes henover et atomart trin på en overflade.

Det er vigtigt at huske, at der ikke er fysisk kontakt mellem proben og prøven. Det betyder nemlig, at det ikke er prøvens topologi, dvs. fysiske overfladestruktur, der afbildes, men derimod elektrontætheder i prøvens overflade. Derfor er det f.eks. muligt at skelne mellem to eller flere forskellige metalatomer på en overflade, selvom de ligger plant i forhold til hinanden. Forklaringen er helt ligetil: Tunnelstrømstyrken er ikke kun afhængig af afstanden mellem elektroderne, men også af hvor mange

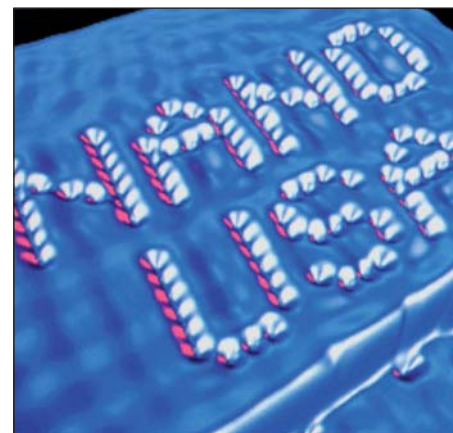
elektroner der kan tunnelere. For grafits vedkommende betyder det, at man netop ser to forskellige grupper af signaler, der tilsammen udgør det velkendte hexagonale mønster fra grafitstrukturen: En type fra de kulstofatomer der danner π -bindinger med kulstofatomer fra det underliggende lag, og en type fra dem der ikke deltager i π -binding. I figuren nedenfor vises et STM-billede af en grafitoverflade og en skematisk tegning af grafitstrukturens to øverste lag.



Ovenfor ses et scanning tunnel mikroskopibillede af grafit (til venstre) samt en model af de to øverste lag i grafits krystalstruktur (til højre).

Den enorme interesse for STM skyldes fortrinsvis, at det med denne teknik er muligt at opnå atomar opløsning af en prøves overflade. Det er muligt at opnå atomar opløsning, fordi proben kan bevæges i ganske små trin i alle retninger. Probens bevægelser styres ved hjælp af piezoelektriske krystaller, dvs. krystaller, der kan ændre dimensioner ved elektrisk påvirkning. Med ganske lave spændinger kan man få en piezoelektrisk krystal til at trække sig sammen eller udvide sig efter behov.

Selvom det normalt undgås, at proben og prøven rører hinanden, er det selvfølgelig muligt at tvinge dem til at få kontakt. Man kan med andre ord manipulere med en prøves overflade, eller med molekyler adsorberet på prøvens overflade, med spidsen af proben. Et af de mest berømte eksempler på dette ses i figuren på næste side. Billedet viser et arrangement af 112 CO-molekyler på en plan kobberoverflade foretaget med en STM-probespids.



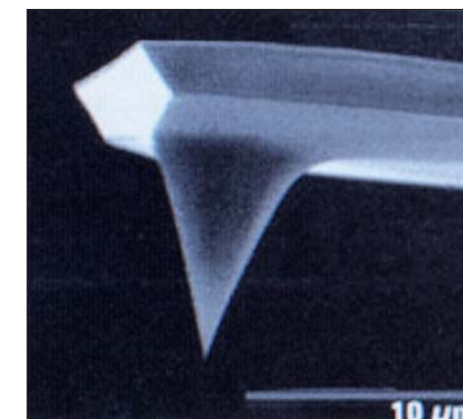
Scanning tunnel mikroskopibillede af en kobberoverflade hvortil 112 CO-molekyler er bundet. Kobberatomerne er farvet blå, og CO-molekylerne er farvet hvide.

Atomic force mikroskopet

Den største fordel ved atomic force mikroskopet (AFM) i sammenligning med scanning tunnel mikroskopet er, at måleteknikken er uafhængig af prøvens elektriske egenskaber, dvs. at man med et AFM ikke er begrænset til at måle på ledende materialer. Desuden kan væsentligt større områder skannes med et AFM end med et STM. Et AFM minder lidt om nanoteknologiens bud på en gammeldags pladespiller, hvor pick-up'en er erstattet af en AFM-probe. Når en overflade skannes, x- og y-retninger, vil proben bevæge sig op og ned, z-retning, for at følge prøvens kontur.

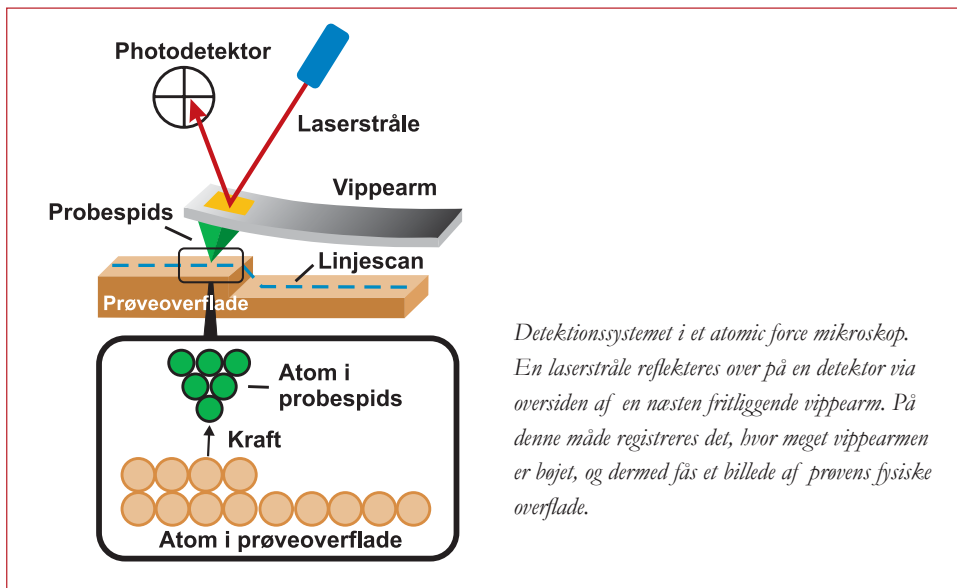
I AFM er afstanden mellem proben og prøven så lille, at det er den svageste form for intermolekulære vekselvirkninger, kaldet van der Waals kræfter, der måles og derved danner basis for mikroskopi-billedet. Van der Waals kræfter er dog så svage, at proben skal være næsten frithængende for ikke bare at skrabe

på prøvens overflade. I princippet har det ikke den store betydning, om der er fysisk kontakt mellem proben og prøven, men i praksis er proben meget skrøbelig og den vil derfor hurtigt blive ødelagt hvis den skrubes henover en prøves overflade. Nedenstående figur viser et billede af en AFM-probe, der er integreret i en meget let og smidig vippearms.



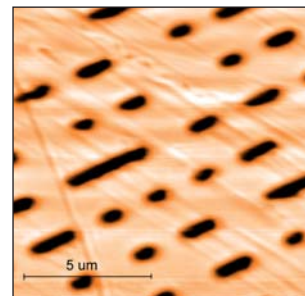
Vippearmen i et atomic force mikroskop.

Prøvens konturer får altså proben til at bevæge sig i z-retningen. Denne bevægelse registreres ved at reflektere en laserstråle rettet mod vippearmens overside over på en detektor. Ud fra, hvor på detektoren den reflekterede laserstråle rammer, kan man få information om, hvor meget vippearmen, og dermed proben, har bevæget sig. På denne måde kan en prøves topologi afbildes. En skematisk illustration af detektionssystemet i et AFM er vist i figuren på næste side.



Detektionssystemet i et atomic force mikroskop. En laserstråle reflekteres over på en detektor via oversiden af en næsten friliggende vippearms. På denne måde registreres det, hvor meget vippearmsen er bøjet, og dermed fås et billede af prøvens fysiske overflade.

Som nævnt stiller AFM ikke de samme krav til en prøves elektriske egenskaber, som STM gør, da det er prøvens topologi, der studeres og afbildes. Dette gør teknikken mere generelt anvendelig, og da AFM desuden er mindre følsom og i øvrigt i stand til at studere væsentligt større områder, anvendes teknikken mere i industrien end STM, f.eks. til kvalitetssikring hos en elektronikproducent. Til højre ses et AFM-billede af en CD-ROM som ikke er blevet belagt med en beskyttende plastikoverflade.

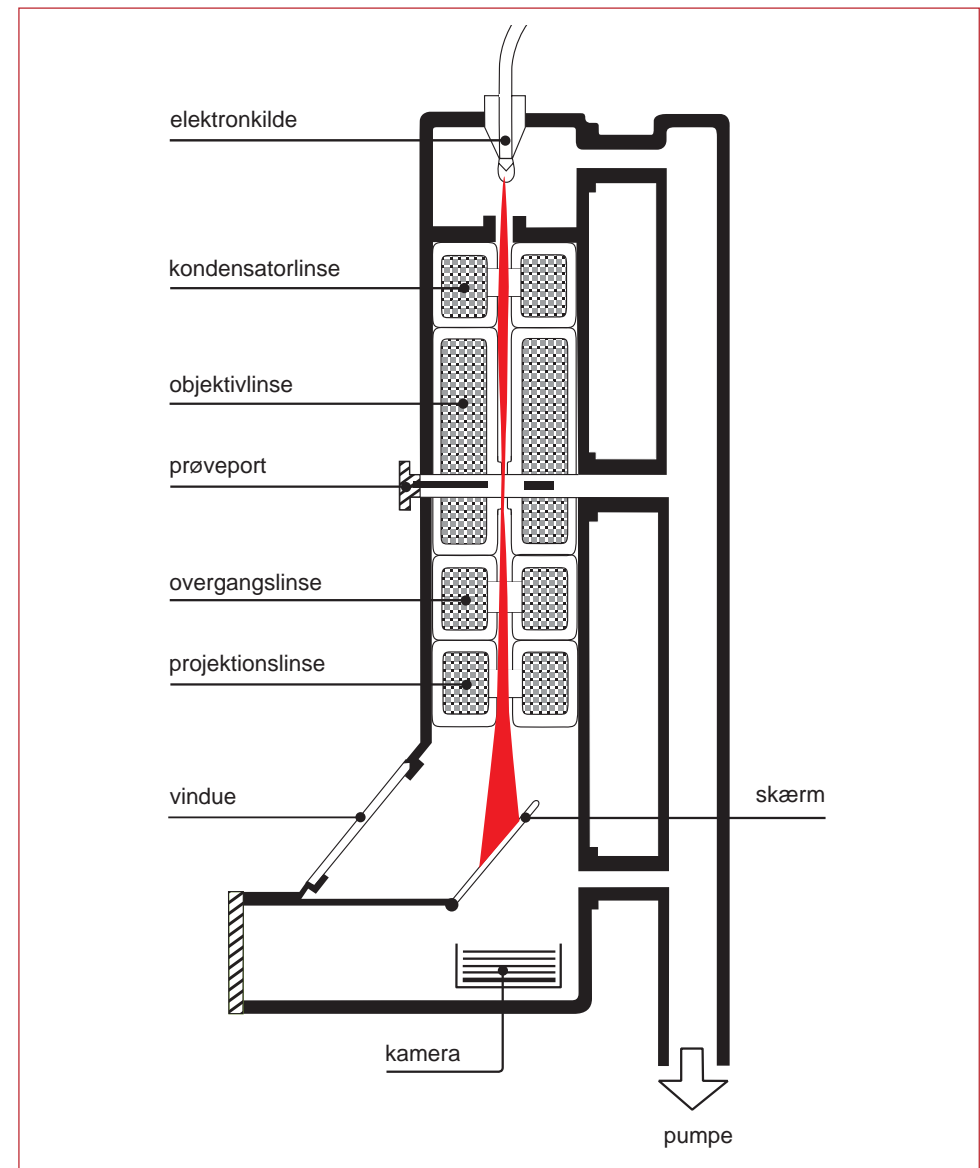


Atomic force mikroskopibillede af en CD-ROM inden denne bliver belagt med plastik. De mørke pletter er huller i overfladen som følge af brændingen.

Scanning elektronmikroskopet og transmissionselektronmikroskopet

Synligt lys har som bekendt bølgelængder i området ca. 400-800 nm, hvilket er betydeligt længere end atomers diameter, som er i størrelsesordenen 1-3 Å. Det er derfor ikke muligt at opnå atomar opløsning med lysmikroskoper. Denne erkendelse blev gjort i 1930'erne, hvor man nåede den nedre fysiske grænse for, hvor små strukturer man ville kunne studere med optiske lysmikroskoper, dvs. strukturer i omegnen af ca. 200 nm. Fysikerne Max Knoll og Ernst Ruska viste, at man ved at

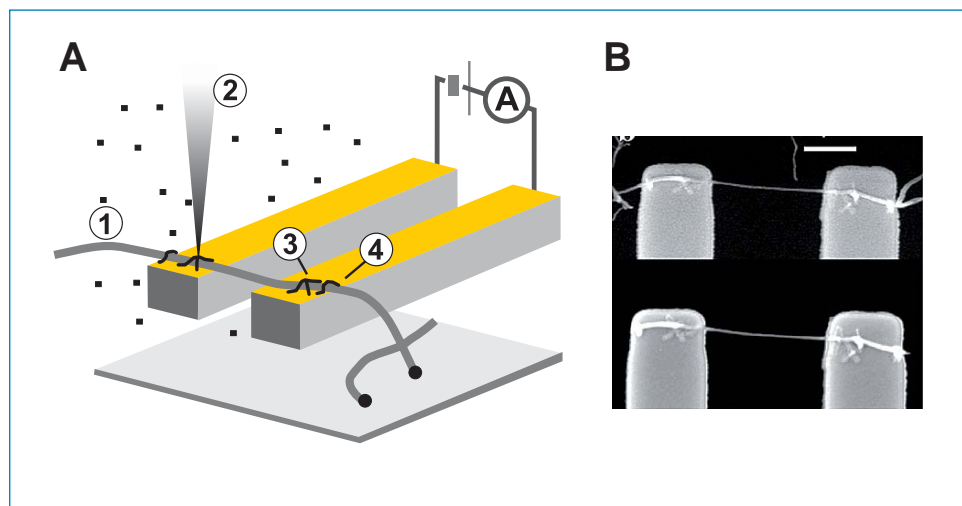
udskifte lyskilden med en fokuseret stråle af elektroner med kortere bølgelængder kunne opnå væsentligt højere opløsning, end det nogensinde ville være muligt med lysmikroskoper. Det var for denne opdagelse Ernst Ruska i 1986 modtog Nobelprisen i fysik sammen med Binnig og Rohrer. Nu om dage anvender de bedste højopløsningselektronmikroskoper elektroner med kinetisk energi på ca. 200 keV. Dette svarer til bølgelængder på ca. 0,006 nm.



Skematisk illustration af et transmissionselektronmikroskop.

Der findes i dag to typer mikroskoper, der anvender højenergielektroner som strålingskilde: transmissionselektronmikroskopet (TEM) og scanning elektronmikroskopet. Et TEM fungerer på principielt samme måde som et optisk lysmikroskop med den forskel, at der anvendes en elektronstråle i stedet for synligt lys. Dvs. en prøve placeret mellem strålingskilden og de-

tektoren vil absorbere noget af strålingen. Den del af strålingen, der ikke absorberes, siges at blive transmitteret gennem prøven. Det er denne del af strålen, der opfanges på detektoren, og derved bliver til mikroskopibilledet. En skematisk tegning af et TEM ses i ovenstående figur.



Til venstre ses en skematisk illustration af lodningeksperimentet: I mikroskopkammeret flyttes et enkelt nanorør, så det ligger på to elektroder. En guldforbindelse sublimeres ind i kammeret og dekomponeres med elektronstrålen. Til højre ses det optagne mikroskopbillede. Bemærk, at der på den højre elektrode er loddet et kryds ved siden af nanorøret.

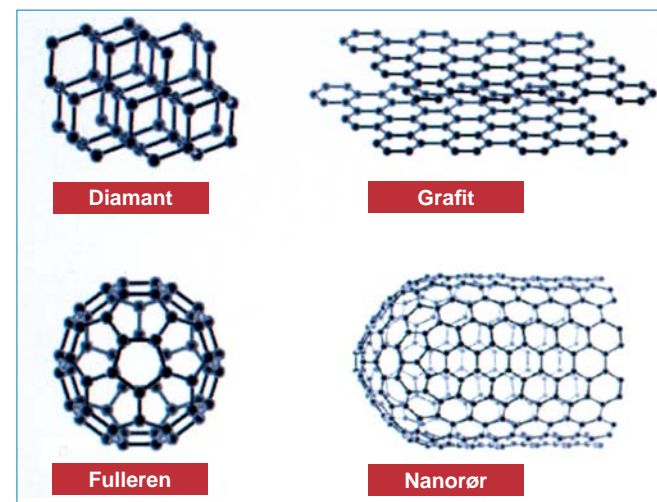
Mikroskoper af SEM-typen tilhører derimod familien af scanning probe mikroskoper, hvor elektronstrålen faktisk er selve prøven. Man kan dog ikke opnå samme høje opløsnings-evne med SEM som med STM, da det teknisk set er overordentligt besværligt at fokusere en elektronstråle til en plet med en diameter, der er mindre end et par nanometer. Derimod kan et SEM give yderligere information om prøven end 'bare' mikroskopbilledet, da elektronstrålen vil vekselvirke med prøven på flere forskellige måder. F.eks. kan SEM også give oplysninger om grundstofsammensætningen i det område elektronstrålen rammer.

Elektronerne i en elektronstråle, af den type der bruges i mikroskoperne, har som sagt meget høj energi. En fokuseret elektronstråle kan derfor bruges til at brænde med, på samme måde som et forstørrelsesglas kan fokusere lys på et mindre område, der derved udsættes for høj energi. Ovenstående figur viser et enkelt kulstofnanorør, der loddes fast på to elektroder med guldkrydser.

Det ses, hvordan det er muligt at foretage en lodning på nanoskala. Det faste stof $\text{Au}(\text{CH}_3)_2(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)$, acetylacetonatodimethylguld, sublimeres ind i SEM-kammeret, hvor det så findes på gasform. Når elektronstrålen fokuseres, indeholder den nok energi til at dekomponere guldforbindelsen til frit guld. Ved kontrolleret at bevæge elektronstrålen hen over prøven er det muligt at lodde et enkelt nanorør fast mellem de to elektroder.

Anvendelse af elektronmikroskopi: Opdagelse af kulstofnanorør

De nye mikroskoper har siden deres opdagelse været særdeles anvendt til at studere gammelkendte forbindelser på ny, og flere store opdagelser er gjort ved nye studier af velkendte forbindelser. Opdagelsen af f.eks. kulstofnanorør er netop et eksempel på en sådan opdagelse.



De fire allotrope former for kulstof. For 20 år siden kendtes kun de to øverste.

Opsigtsvækkende sod

I 1991 rapporterede Sumio Iijima (fra den japanske elektronikgigant NEC) opdagelsen af ultrasmå nåleformede fibre udelukkende bestående af kulstofatomer efter at have studeret sodpartikler i et moderne elektronmikroskop. Fibrene viste sig at være lange rør opbygget af cylindere af sammenrullede grafitlag og blev hurtigt kendt verden over som kulstofnanorør. Siden Iijimas opsigtsvækkende opdagelse har nanorør været studeret intenst, specielt på grund af de mange potentielle anvendelsesmuligheder som f.eks. kunne være til kemiske sensorer, solceller og ultrastærke fibre.

Kulstofnanorør var dog også interessante fra et rent videnskabeligt perspektiv, da der var tale om en ny allotrop form for kulstof (dvs. en ny rumlig opbygning af kulstof), nemlig en blanding af grafit og fulleren (opbygningen af kulstof der har form som en fodbold). I figuren ovenfor ses de fire allotrope former for kulstof.

Rørformige kulstofhønsenet

I dag skelner vi først og fremmest mellem to forskellige typer kulstofnanorør, de såkaldte

flervæggede (MWCNT Multi-Walled Carbon Nanotubes), som dem Iijima opdagede i 1991 og de enkeltvæggede (SWCNT Single-Walled Carbon Nanotubes), som opdagedes i 1993 af både Iijima og Donald Bethune fra IBM uafhængigt af hinanden. Fælles for de to typer er, at de er opbygget af et eller flere lag af kulstofatomer arrangeret i hønsenetstruktur (som grafit). Afhængigt af hvordan hønsenettet slutes sammen til rør, vil de være enten regulære eller snoede. I den ene ende er de normalt lukkede med en halvkugleform, hvilket fås ved at nogle af de seksatomige kulstofringe erstattes af fematomige.

Hønsenetstrukturen gør nanorør uhyre stærke på grund af de meget stærke bindinger mellem kulstofatomerne, ligesom f.eks. diamant og grafit. De er desuden meget smidige, da spændingen som følge af en bøjning kan spredes over mange atomer i røret, og de kan derfor bøjes meget langt, før de knækker. Disse egenskaber gør, at nanorør potentielt kan anvendes til at forstærke byggematerialer, som f.eks. kunne bruges til at lave biler, der kolliderer som radiobiler, eller huse der bare vibrerer under et jordskælv.

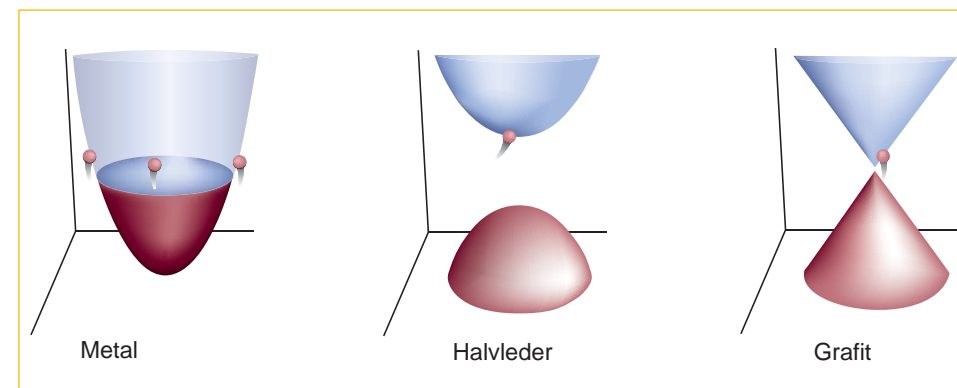
Hårfin elektronik

Med diametre for nanorør helt ned til 1 nm, eller mere end 10.000 gange tyndere end et hår, er fremtidens elektronik flere størrelsesordener mindre, end selv det mindste nutidens teknologi nogensinde vil kunne præstere. Og mange af nanorørens egenskaber er netop en konsekvens af deres nanoskopiske størrelse og rørformige struktur. Det gælder i særdeleshed for deres elektriske egenskaber. En sammenligning af kulstofnanorørs egenskaber med eksisterende teknologiers findes i nedenstående tabel.

Generelt kan man inddеле materialer efter deres ledningsevne. Dette gør man ved at se på den

energiforskel, kaldet båndgab, der er mellem valensbåndet (de elektronfyldte tilstande) og ledningsbåndet (de elektrontomme tilstande). I nogle materialer, f.eks. metaller, er der intet båndgab, og elektronerne kan derfor frit hoppe fra valensbåndet til ledningsbåndet og dermed lede strøm. Materialer af denne type siges at være metallisk ledende. Andre materialer har et båndgab, således at de normalt ikke kan lede en strøm. Er båndgabets størrelse lille nok, til at den kan overvindes ved en ydre påvirkning (f.eks. med lys), således at materialet bliver ledende, er der tale om en halvleder, hvorimod materialer med meget store båndgab ikke kan gøres ledende og derfor benævnes isolatorer.

Egenskab	Single-walled kulstofnanorør	Til sammenligning
Størrelse	0,6–1,8 nm i diameter	Elektronstrålelitografi kan skabe linjer der er 50 nm brede og få nm dybe
Densitet	1,33–1,4 g/ml	Desiteten af aluminium er 2,7 g/ml
Brudstyrke	45 GPa	Højstyrkestål kan tåle op til 2 GPa før det knækker
Elasticitet	Kan bøjes meget uden at ødelægges	Metaller og kul fibre knækker i korngrænserne
Elektrisk belastningsevne	Estimeret ca. 1 GA/cm ²	Kobberledninger brænder ved 1 MA/cm ²
Feltemission	Kan aktivere phosphorer ved 1–3 V hvis elektroderne er 1 µm fra hinanden	Molybden tips kræver 50–100 V/µm og har meget lav holdbarhed
Varmeledningsevne	Estimeret ca. 6.000 W/m·K ved stuetemperatur	Næsten ren diamant leder 3.320 W/m·K
Temperaturstabilitet	Stabil op til ca. 2.800 °C i vakuum og op til ca. 750 °C i luft	Metaldele i mikrochips smelter ved 600–1000 °C
Pris	\$250 pr. gram fra Bucky USA	Guld koster ca. \$15 pr. gram



Et materiales evne til at lede strøm afhænger af energiforskellen mellem det lavliggende elektronfyldte valensbånd (rød) og det højereliggende elektrontomme ledningsbånd (blå).

Grafit er en meget speciel, såkaldt semimetallisk, leder. I semimetallisk ledende materialer er der som i metaller intet båndgab, men i modsætning til metalliske ledere er det kun ganske få elektroner, der kan hoppe fra valensbåndet til ledningsbåndet. Da hønsenetstrukturen i et mavebælte omkring nanorør ikke er uendelig som i grafit, er man nødt til at tage kvantemekanikken i betragtning for at forstå nanorørens elektriske egenskaber, dvs. at elektroner kan opfattes som enten partikler eller bølger. En elektronisk bølge omkring et nanorør vil kun have konstruktiv interferens, hvis dens bølgelængde passer til rørets diameter. Sammenholdes dette med grafits semimetalliske ledningsevne, vil kun nanorør med en passende diameter og den rette grad af snoethed være ledende, mens andre bliver halvledende med varierende båndgab. Rørene i et MWCNT vil altså kunne have forskellige båndgab og vil derfor, i princippet, kunne bruges til at sende forskellige signaler uafhængigt af hinanden. Knap så langt ude i fremtiden er anvendelsen af SWCNT som halvledere i chipindustrien. Forskere fra IBM har nemlig vist, at det er muligt at fremstille et sæt transistorer af SWCNT,

der er ca. 500 gange mindre end konventionelle siliciumbaserede transistorer.

Desuden har det vist sig, at nanorør monteret på en overflade kan gøres elektriske og udsende elektroner i den anden ende. På grund af deres størrelse kræves lavere spændinger end normale såkaldte feltemittere, hvilket kan medføre længere levetid. Feltemittere kan f.eks. anvendes som lyskilder eller i diverse displayapplikationer. De umiddelbare fordele er, at de bruger mindre strøm, har forlænget holdbarhed og er forbavsende simple at fremstille, idet man bare smører en plastik-nanorørblending på en elektrode. Produkter, der udnytter nanorørs egenskab som feltemitter, er allerede på vej til masseproduktion.

Moderne alkymi

Nanorør fremstilles primært på tre måder: I gnisten fra en kulbue mellem to grafitelektroder, ved dekomponering af kulbrinter over en metalkatalysator eller ved at bestråle grafit med en laserstråle. Metoderne har alle deres fordele og ulemper: Kulbue metoden giver meget ensartede nanorør, som dog er relativt korte (under 50 µm) og i ringe udbytte. Dekomponeringen af kulbrinter egner sig i høj grad til masseproduktion, og de fremstillede nanorør er lange nok til at kunne bruges som fibre, til gengæld er de fyldt med defekter. Endelig er

lasermetoden fantastisk til at fremstille ensartede nanorør med en veldefineret diameter, desværre er laseren forfærdelig dyr.

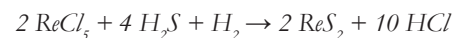
Indtil for nylig vidste man ikke, hvordan nanorør faktisk groede, men en gruppe danske forskere kunne i januar 2004 offentliggøre mikroskopibilleder af nanorør under dannelsesprocessen. I et moderne TEM kunne de følge, hvordan CH_4 -molekyler dekomponerede til nanorør over en nikkelkatalysator. Denne opdagelse er et vigtigt skridt på vejen til at forstå mekanismen for dannelse af nanorør således, at vi på sigt kan gøre os håb om bedre og ikke mindst billigere nanorør. For tænk bare: Med dagens priser er fremstilling af nanorør fra naturgas en betydelig bedre forretning end at omdanne bly til guld!

Nanoteknologi og syntesekemi: Design af nye materialer

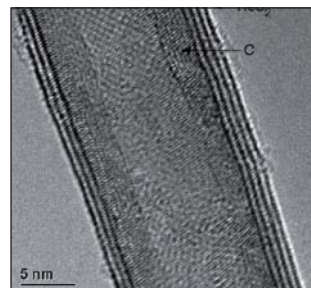
De største udfordringer for nanoteknologiens udbredelse ligger i dag i design og fremstilling af nye kemiske systemer med spændende egenskaber, som kan udnyttes i nye typer produkter. For tiden er der to tilgangsvinkler til det at fremstille nye materialer, populært kaldet top-down og bottom-up. Top-down metoden, hvor store ting nedbrydes til mindre, tilbyder i sagens natur ikke den samme kontrol over de fremstillede materials egenskaber, som er mulig med bottom-up metoden, hvor større ting opbygges af mindre enheder.

Syntesekemi er derfor et af de helt centrale værktøjer i den videre udvikling af nanovidenskab og nanoteknologi ved bottom-up metoden, for det at fremstille nye materialer ud fra mindre enheder som molekyler og ioner handler jo netop om at skabe og bryde kemiske bindinger. Det nye i denne sammenhæng er, at man er i stand til at kontrollere ikke bare om en kemisk reaktion vil foregå, men også *hvor*

den skal foregå. For eksempel er det muligt at omdanne ReCl_5 til ReS_2 efter følgende reaktionsskema:

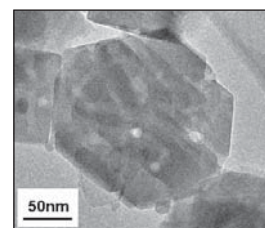


Udføres samme reaktion derimod med ReCl_5 adsorberet på den ydre overflade af kulstofnanorør, bliver kulstofnanorørene belagt med nye lag af ReS_2 nanorør. Nedenstående figur viser de fremstillede ReS_2 -nanorør med en indre kerne af kulstofnanorør.



Transmissionselektronmikroskopibillede af ReS_2 -nanorør groet omkring et multi-walled kulstofnanorør.

Et andet eksempel er zeolitter – aluminium silikater med kanaler i størrelsesordenen 3-10 Å, dvs. 0,3–1 nm, der bl.a. bruges som katalysatorer i raffinaderiindustrien og som blodgørere i vaskepulver. Fremstilles en zeolit i tilstedeværelse af kulstofnanorør vil zeolitkrystallerne gro omkring nanorørene. Kulstofnanorørene kan derefter fjernes ved forbrænding, dvs. omdannelse til CO_2 , hvorved zeolitkrystallerne udover deres naturlige kanalsystem også vil have kanaler i nanorørens størrelse. Sådanne såkaldte *mesoporøse* zeolitkrystaller tillader, at et større antal molekyler kan trænge ind til, og ikke mindst ud af, zeolittens katalytisk aktive kanalsystem, og de er dermed bedre katalysatorer end konventionelle zeolitkrystaller. I figuren på næste side ses en mesoporøs zeolitkrystal, som er lavet ved at krystallisere zeolitten i tilstedeværelse af MWCNT og efterfølgende brænde kullet af.



Scanning elektronmikroskopibillede af en mesoporøs zeolitkrystal krystalliseret i tilstedeværelse af kulstofnanorør efter afbrænding af kulstofnanorørene. Det ses at krystallen er hullet som følge af afbrændingen af kulstofnanorørene.

I praksis er det nærmest kun fantasien, der sætter grænser for, hvilke nye nanomaterialer man vil kunne fremstille, og hvilke anvendelser der kan komme på tale. Derfor er nanoteknologi et område, der vil se fortsat hastig vækst i de nærmeste år, og hvor kemiens muligheder er uudtømmelige. Nanoteknologien venter bare på, at iderige unge forskere og studerende skal tage fat.

Forfattere



Ph.d. studerende
Kresten Egeblad



Professor Claus Hviiid
Christensen