

Fra grafit til nanomaterialer

Carbon nanorør har mange interessante egenskaber og dermed mange mulige anvendelser. En af disse anvendelser er som strukturdanner i fremstillingen af funktionelle nanomaterialer

Af Anne Krogh, Mads M. Andreasen, Astrid Boisen, Iver Schmidt, Michael Brorson, Søren Dahl, sda@topsoe.dk og Claus J.H. Jacobsen, chj@topsoe.dk, Haldor Topsøe A/S

Hvis man med et ord skal karakterisere grundstoffet carbons kemi, må det være: Alsidig.

Ikke kun som rygrad i alle organiske forbindelser, med sin helt egen gren af kemien, indtager carbon en særstatus. I sin rene form spænder det fra det hårdeste til et af de blødeste materialer, og med de såkaldte fullerener er der de sidste 20 år fundet så mange nye eksotiske former, at der nu til carbons egenskaber kan tilføjes: superleder, stærkeste fiber og bedste elektriske leder.

Især spås de såkaldte carbon nanorør at have potentiale til at revolutionere inden for flere teknologiske områder i kraft af deres unikke mekaniske og elektriske egenskaber. Desuden kan de som følge af deres små dimensioner danne grundlaget for en helt ny æra inden for formgivning og design af andre nanomaterialer, eksempelvis zeolitter og metaloxider.

længdeaksen, vandret stablet eller stablet i et sildebensmønster. Whiskers har normalt diametre mellem 10 og 100 nm. Grafit-formen findes også i en variant med løglignende struktur bestående af op til omkring 70 koncentriske, sfæriske graphenlag [1,2].

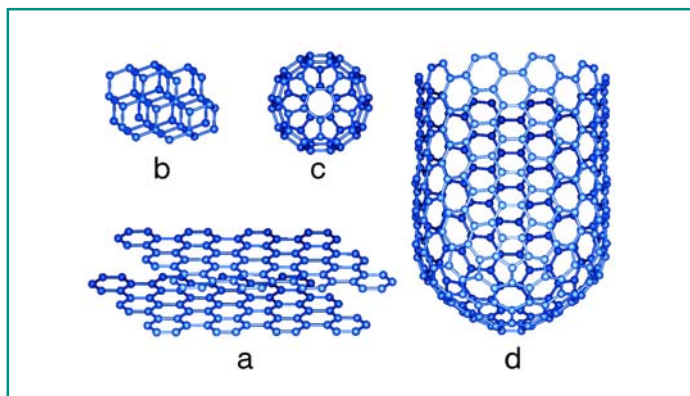
I 1985 opdagedes en fundamentalt anderledes kulstofstruktur af Richard Smalley og Harry Kroto: Buckyballs, buckminsterfullerener eller fullerener, som de også kaldes, er kugleformede eller elipsoide C_n -molekyler, hvor $n \geq 20$ [3]. C_{60} , som ligner en fodbold, er den først opdagede og mest berømte af disse (figur 1c). Buckyballs er opkaldt efter den amerikanske arkitekt Buckminster Fuller, der designede hemisfæriske domer af penta- og hexagoner.

Buckyballs kan fremstilles ved fordampning af kulstof i en elektrisk lysbue, men kan også forekomme i sod fra afbrænding af organisk materiale [1,3,4].

I 1991 opdagede Sumio Iijima fra NEC i Japan en ny type kulstof, som skulle vise sig mindst ligeså interessant og med et langt større teknologisk potentiale end buckyballs. Ved elektronmikroskopi af en sodprøve fra en gnistfordampet kulelektrode så han lange perfekte rør af ren kulstof, carbon nanorør (eng.: carbon nanotubes).

Hvad er carbon nanorør?

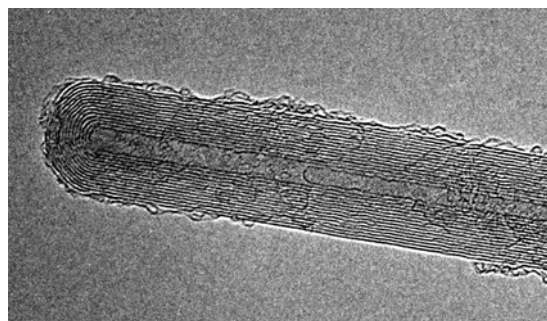
Carbon nanorør er opbygget af graphener, altså grafitlag, der er rullet sammen til en »sømløs« cylinder. De nanorør Iijima først så, var de såkaldte flervæggede nanorør (eng.: Multi Walled NanoTubes, MWNT). Her ligger flere koncentriske rør inde i hinanden ligesom lagene i en porre (figur 2). Disse rør har meget varierende tykkelse, typisk 4-40 nm, og forskellige hulrumsdiametre afhængig af antallet af graphenlag og den ydre diameter.



Figur 1. Allotrope former af kulstof. a: grafit, b: diamant, c: buckyball, C_{60} , d: enkeltvægget carbon nanorør.

Grafit, graphener og fullerener

Før 1985 kendte man kun til to allotrope former af kulstof: diamant, hvor hvert kulstofatom er bundet tetraedisk til fire andre kulstofatomer i et tredimensionalt gitter (figur 1b) og grafit, hvor kulstofatomerne er trigonalt bundet til hinanden i todimensionale lag af hexagoner (figur 1a). Disse lag af kondenserede benzenringe kaldes graphener og er grundlaget for forskellige overordnede strukturer af grafit, såsom kulfibre og grafitwhiskers. Kulfibre, der bl.a. anvendes til kompositmaterialer, er ganske tykke fibre; diameteren ligger normalt omkring 10 μm [1]. De er dannet ved pyrolyse af polymerfibre og har en relativ uordnet graphenstruktur. Grafit-whiskers er opbygget af graphenlag enten i lag rundt om



Figur 2. TEM-billede af et flervægget carbon nanorør, med rester af amorf kulstof. Røret er ca. 12 nm tykt og består af 15 lag – det inderste rør er lidt kortere end de andre.

Kort efter fandt man også en variant med kun et lag. Disse enkeltvæggede rør (eng.: Single Walled NanoTubes, SWNT) er typisk mellem 1 og 2 nm i diameter, men alt fra 0.6 til 5 nm er set. Både enkelt- og flervæggede carbon nanorør er efter dannelsen lukkede i enderne; for enkeltvæggede nanorørs vedkommende med en buckyball-halvkugle.

Fremstilling af nanorør

Der er tre måder, hvorved man i dag kan danne carbon nanorør. To af metoderne involverer fordampning af grafit i en inert atmosfære; enten vha. en gnist mellem to grafit elektroder eller ved at beskyde grafit med en meget kraftig laser. Herved »aflejres« carbon nanorør af forskellig art i kammeret sammen med amorft kulstof og buckyballs. Ved at variere temperaturen og tilsætte katalysator (se nedenfor) kan man ændre den relative forekomst af de forskellige kulstofformer, og prøver med stort indhold af meget ensartede nanorør er blevet syntetiseret på denne måde. Imidlertid er det meget energikrævende og for laserfordampningens vedkommende meget dyrt apparatur, der skal anvendes, hvis man skal fremstille carbon nanorør i større mængder.

Derfor er fokus mange steder nu gået i retning af Chemical Vapour Deposition (CVD), hvor en gas ledes henover en katalysator og dekomponeres, typisk ved temperaturer mellem 600 og 1000°C. Katalysatoren består af nanometer store partikler af overgangsmetaller og -metaloxider (oftest Fe, Co og Mo i forskellige kombinationer), som kan spalte f.eks. carbonhydrider og CO og katalysere dannelsen af carbon nanorør. For at hindre sintring af de katalytisk aktive metalklynger ved CVD-syntesens høje temperaturer, er de fordelt på en inaktiv bærer af eksempelvis aluminiumoxid eller siliciumoxid.

Selve vækstprocessen af nanorør er ikke forstået i detaljer, men man ved, at overgangsmetal(oxid)partikler omdannes til overmættede metalcarbider, der udskiller kulstoffet langs kanten. Derfor er ikke alene

reaktionsbetingelserne og den kemiske sammensætning afgørende for hvilke typer af rør, der dannes, men også størrelsen af partiklerne. Under processen dannes nanorør med en kulstofindkapslet katalytisk partikel i den ene ende. Væksten af nanorørene formodes at stoppe netop pga. fuldstændig kulstofindkapsling af katalysatoren.

For at lette oprensningen af carbon nanorør kan man i stedet for aluminiumoxid som bærer bruge magnesiumoxid, der let opløses i fortyndet syre, som ikke skader carbon nanorør. Man kan også helt undlade en bærer og i stedet danne de katalytisk aktive metalpartikler *in situ* i gasfase. Dette kan f.eks. gøres ved at lede gasformig ferrocen ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) eller jerncarbonyl ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) ind i reaktionskammeret sammen med henholdsvis benzen eller CO. Her spaltes jernforbindelserne under dannelse af jern-nanopartikler, hvorfra carbon nanorørene gror. Under alle omstændigheder er det dog meget vanskeligt at fjerne de inerte kulindkapslede metal-nanopartikler uden at skade rørene.

Hvorfor er carbon nanorør så interessante?

Set fra en materialekemisk eller teknologisk vinkel er det få materialer, der på en gang er så alsidige og samtidigt ekstreme i deres egenskaber som carbon nanorør. Selv den simpleste form, enkeltvæggede carbon nanorør, har forbavsende mange interessante egenskaber. Kemisk set er carbon nanorør meget stabile, de tåler op til 750°C i luft og ca. 2800°C i vakuum og de fleste kemikalier bortset fra f.eks. meget stærkt oxiderende syrer. Mekanisk set er carbon nanorør den stærkest tænkelige fiber med en brudstyrke omkring 25 gange højere pr. tværsnitsareal og en massefylde ca. 5 gange mindre end de stærkeste stållegeringer. Modsat almindelige grafitfibre er carbon nanorør ikke sprøde, men kan bøjes i store vinkler uden at knække [7]. Desværre fås carbon nanorør sjældent over 100 µm lange.

Længde og tykkelse er ikke de eneste

RETUREMBALLAGE ... er vejen frem!

MAXIMOVER IBC



Til pulver, granulat, væske mm. Også UN godkendt.

IBC



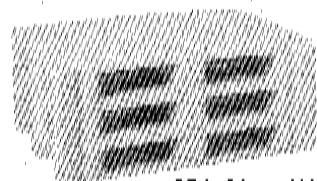
Isoleret IBC med varme-modul

SEMIENENKO VALVE

En ny patent. konisk ventill. Unik til vanskelige pulvere



HYGIEJNE PALLER



CR1, S1 og H1 med CII godkendelse.

CAMBRO HYGIEJNE REOL

Reolsystem i forstærket plast til fryserum, laboratorier, vådområder etc.

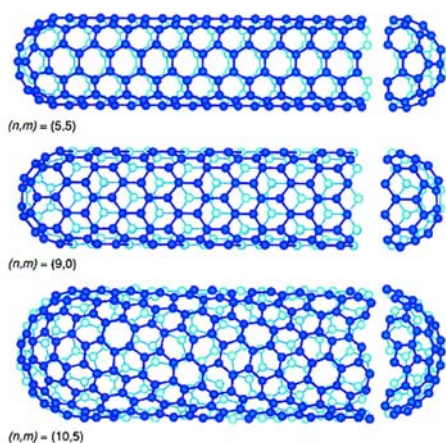


Behov for Interne eller eksterne opbevarings- og transportløsninger? Bekvmer specialkatalog eller vort store 120 siders sortimentskatalog



UNIVERS A/S
Tlf. 8767 9000
Fax 8668 4134

univers@universagency.dk
www.universagency.dk



Figur 3. Illustration af opbygningen af ikke-chirale (armchair og zig-zag, hhv. øverst og i midten) samt chiralt carbon nanorør (nederst).

eller oprense selektivt med hensyn til struktur. Imidlertid kan man dels ved STM (Scanning Tunneling Microscopy) og dels ved Raman spektroskopi [8] af individuelle enkeltvæggede carbon nanorør bestemme deres eksakte struktur. Sidstnævnte teknik kan i øvrigt også bruges til at skelne mellem enkelt- og flervæggede nanorør.

Molekylær elektronik

I øjeblikket er nye materialer og koncepter inden for mikroelektronik det eneste, der kan sikre udviklingen i retning af hurtigere og mindre elektronik. Den absolut mindste ledning, man kan tegne med SEM-lithografi (SEM: Scanning Electron Microscopy), er nu 30 nm bred og bliver næppe meget mindre [9]. Et metallisk ledende carbon nanorør ville være den ideelle afløser, hvis man systematisk kunne udvælge og anbringe den det ønskede sted. Metalliske enkeltvæggede carbon nanorør kan desuden føre ca. 1000 gange mere strøm pr. tværsnit end en kobberledning uden at brænde over [7].

Som transistorer er carbon nanorør også unikke, ikke alene pga. størrelsen, men med enkeltvæggede carbon nanorør kan man i princippet med det samme materiale justere på båndgabets ved at vælge den ønskede chiralitet og diameter. Man har demonstreret, at enkeltvæggede carbon nanorør kan virke som del af en felleffekt-transistor, der ifølge teoretiske beregninger ville kunne skifte med frekvenser i størrelsesordenen tera-Hertz, dvs. 1000 gange hurtigere end i dag [7].

Ligesom elektriske felter kan molekylers vekselvirkning med overfladen af et carbon nanorør påvirke dets elektriske egenskaber. En oplagt mulighed, for at udnytte dette, er at fylde nanorørets indre med forskellige materialer, f.eks. ledende polymerer eller buckyballs. Ved at åbne enderne på enkeltvæggede carbon nanorør med ultralyd er det f.eks. muligt at lade gadoliniumfyldte buckyballs diffundere ind i dem ved ca. 400°C. Derved lægger disse buckyballs sig som perler på en snor inde i røret [10].

Selv ved stuetemperatur giver påvirkning med gasser markante udslag i carbon nanorørs elektriske ledningsevne, hvilket kunne gøre dem velegnede som sensorer. Alternativt kunne man f.eks. for enden af et rør binde et molekyle, der ved gæst-vært-kompleksdannelse eller lyspåvirkning giver anledning til en elektronoverførsel. Et carbon nanorør kunne således være bindeleddet mellem den mikro- og makroskopiske verden og starte udviklingen af en ny generation af måleudstyr.

Enkeltvæggede carbon nanorør er med sine unikke elektriske egenskaber også interessant ud fra et faststoffysisk og teoretisk synspunkt, idet man ved at kontakte enkelte af disse carbon nanorør med elektroder har mulighed for at studere forskellige endimensionale elektronsystemer eksperimentelt.

Produkter med carbon nanorør

På markedet findes i dag kun ganske få produkter, der anvender carbon nanorør. De tre primære områder er:

- Som tilsætning til polymerer for at gøre dem antistatiske og elektrisk skærmende.
- Som spidser i feltemissionsskærme, der er en flad udgave af billedrøret, hvor hver pixel tegnes af sin egen separate elektronstrøm. Nanorørs lille krumningsradius i spidsen gør dem operative ved langt lavere spændinger, så strømforbruget er meget mindre og holdbarheden længere end med konventionelle elektroder.
- Inden for skanning-probe-teknologien, f.eks. AFM (Atomic Force Microscopy) har både enkeltvæggede og flervæggede carbon nanorør vist sig at give meget større lateral opløsning end konventionelle spidser, der typisk er formet som en lille pyramide, hvis toppunkt har en krumningsradius på mellem 5

strukturelle parametre for et enkeltvægget carbon nanorør. Måden, hvorpå graphenlaget er rullet op for at danne nanorøret, spiller også en stor rolle, om ikke for de mekaniske, så for de elektriske egenskaber. Forestiller man sig, at man fra et graphenlag skærer et langt rektangulært udsnit og sammenføjer de to lange sider, afhænger strukturen af, hvordan rektanglet er orienteret i forhold til rækkerne af hexagoner i graphenlaget. Hvis rektanglets sider er parallelle med hexagonrækkerne, vil man se røret som opbygget af ringe af hexagoner med spidsen enten i rørets retning eller på tværs (hhv. zig-zag og armchair) – sådanne rør kaldes ikke-chirale (figur 3). Hvis rektanglet ikke er parallel med hexagonerne, ligger disse som spiraler langs røret, som så er chiralt (figur 3).

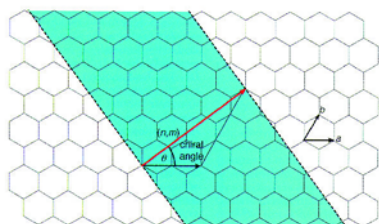
For flervæggede carbon nanorør er der tilsyneladende ingen sammenhæng mellem de enkelte lags strukturtype. For at forstå nanorørs elektriske egenskaber studerer man derfor primært de simple enkeltvæggede carbon nanorør.

For carbon nanorør gælder, at alle armchair rør er metallisk ledende, mens zig-zag og chirale rør generelt er halvledere (se boks, figur 4) med et båndgab på omkring 1 eV (omvendt proportionalt med diameteren) og således ikke er ledere ved stuetemperatur. Da dannelsesenergien og vekselvirkningen med overflader er så godt som identiske for rør med forskellig chiralitet, er der for tiden, ingen mulighed for hverken at dyrke

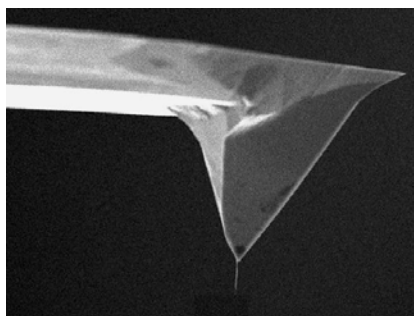
Struktur af nanorør

Strukturen af et nanorør kan bedst beskrives som om det er dannet ved at skære en bane – det blå område på figuren – ud af et graphenlag og rulle det til en cylinder. Vektoren $\mathbf{C}$, der forbinder kantpunkter som mødes på cylinderen, kaldes oprulningsvektoren. Med denne vektor har man en entydig karakterisering af nanorøret (på nær længden og ende-geometrien) ud fra de to basisvektorer $\mathbf{a}$ og $\mathbf{b}$, idet $\mathbf{C} = (n,m) = n\mathbf{a} + m\mathbf{b}$. Vinklen mellem vektoren $\mathbf{a}$ (zigzag-retningen) og $\mathbf{C}$, kaldes den chirale vinkel θ .

Armchair nanorør har generelt koordinaterne (n,n) og zigzag $(n,0)$. Man kan vise, at oprulningsvektoren $\mathbf{C}$'s koordinater skal opfylde relationen $(n-m) = 3p$, hvor p er et heltal eller 0, for at nanorøret er metallisk ledende. Dvs., at alle armchair er ledende, mens det generelt kun er tilfældet for ca. 1/3 af alle andre rør – resten er halvledere.



Figur 4. Nanotube med oprulningsvektoren $(n,m) = (2,3)$ - et chiralt nanorør.



Figur 5. Elektronmikroskopibillede af en konventionel Si-spids til AFM, hvorpå der er limet et ca. 6 µm langt flervægget nanorør.

og 30 nm. Enkeltvæggede carbon nanorør er ca. 1 nm tykke nåle, der kan udgå fra den oprindelige AFM-spids (figur 5). De er fleksible og kan give efter, hvis spidsen presses for hårdt mod prøven, hvilket ellers ofte ødelægger en spids. Nanorør kan også modificeres kemisk og give anledning til meget nøjagtige funktionaliserede spidser.

Carbon nanorør som strukturdannere

Carbon nanorør har også interessante egenskaber som strukturdannere. Ved at syntetisere materialer udenom nanorørene skabes der mange muligheder for at styre morfologien af disse materials krystaller. Nanorør er, som før nævnt, kemisk inerte overfor de fleste kemikalier og er samtidig termisk stabile. Derfor kan de benyttes som strukturdannere i en lang række synteser. Da carbon nanorørs diameter typisk ligger mellem 1 nm og 40 nm, kan man, ved at brænde carbon nanorørene væk efter syntesen af krystallerne, introducere mesoporer af varierende størrelse i krystallerne. Herved er der mulighed for at skræddersy morfologien ved at bestemme porestruktur og porøsitet af de syntetiserede krystaller.

Formgivning af zeolitter

Zeolitter anvendes i industrien som katalysatorer for en lang række reaktioner. Zeolitterne har i kraft af krystalstrukturens

mikroporer på omkring 5-10 Å et meget stort indre overfladeareal med tilgang til de aktive sites. Krystallernes mikroporer er af nogenlunde samme størrelse som molekylerne, der indgår i reaktionerne, og zeolitterne udviser derfor en form og størrelsesselektivitet, som kan udnyttes i katalyse.

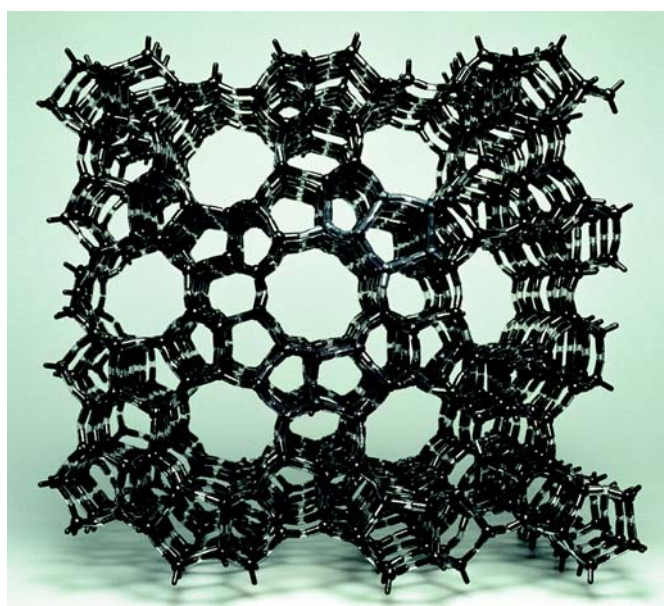
Ved at introducere intrakrystalline mesoporer i de mikroporøse zeolitter vil det være muligt at øge tilgængeligheden af det indre overfladeareal. Effektiviteten pr. masseenhed er derfor langt større end for en konventionelt fremstillet zeolit med det samme ydre overfladeareal. Dette er også eftervist ved katalytiske forsøg [6].

Syntese af mesoporøse zeolitkrystaller er før foregået i en matrix af carbon black [5,6]. Carbon black er stykker af graphenlag, der danner en sfærisk partikel på 10-20 nm i diameter. Efter krystallisering af zeolitterne omkring carbon black brændes kullet af ved opvarmning i luft (kalcinerings), og kun den mesoporøse zeolit med aftryk af kullet er tilbage. Mesoporerne er på størrelse med de afbrændte agglomerater af carbon black-partikler, som krystallen er dannet omkring.

Ved at lade zeolitkrystallerne gro omkring carbon nanorør vil man kunne skabe zeolitkrystaller med lange lige indre kanaler. De tilfældigt orienterede intrakrystallinske mesoporer vil være af samme størrelse som carbon nanorørene. De lange lige kanaler bevirker en relativ stor kontrol af morfologien i forhold til mesoporer skabt af carbon black, og der opnås en let tilgang for reaktanter og let afgang for produkter.

Et eksempel på en mesoporøs zeolit én-krystal dannet i carbon black ses på figur 7a, side 28, mens TEM-billedet på figur 7b, side 28, viser en zeolit én-krystal dannet i carbon nanorør.

De lyse områder på figur 7a og 7b, side 28, indikerer områder med mindre densitet, svarende til at der før kalcineringen har siddet carbon nanorør eller carbon black. Carbon black har på figur 7a udelukkende dannet porer af forbundne sfæriske hulrum i krystallen med et tværsnit på ca. 20 nm, hvor carbon blacks diameter ligger på ca. 12 nm. På figur 7b ses de cylindriske mesoporer at gå både parallelt med billedfladen, som ormehuller gennem krystallen, og vinkelret på billedfladen, hvor et cirkulært hul derfor ses. Diameteren på



Figur 6. Model af en zeolit med MFI-struktur. De sorte molekyler symboliserer Si, hvormellem der sidder oxygen-atomer. Bredden af denne model svarer til ca. 25 Å.

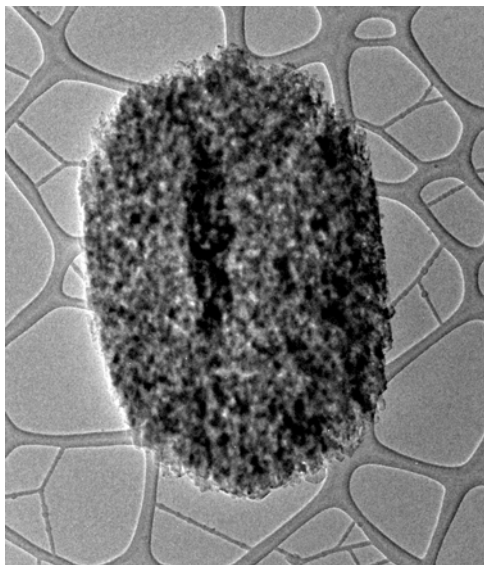
Hvad er zeolitter?

Zeolitter er et uorganisk materiale opbygget af $[\text{SiO}_4]^{4-}$ og $[\text{AlO}_4]^{5-}$ -tetraedere i et stift og meget porøst tredimensionelt gitter. Den generelle formel er $\text{M}_{x/n}[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot z\text{H}_2\text{O}$. M er ladningskompensator og kan f.eks. være H^+ , hvilket gør zeolitten sur, eller andre kationer såsom Na^+ og Ca^{2+} .

Zeolitter forekommer i naturen, hvor de dannes i bl.a. vulkaner ved højt tryk og relativ høj temperatur. Zeolitter kan desuden fremstilles syntetisk ved at efterligne de naturlige betingelser med høj temperatur og tryk samt basisk miljø.

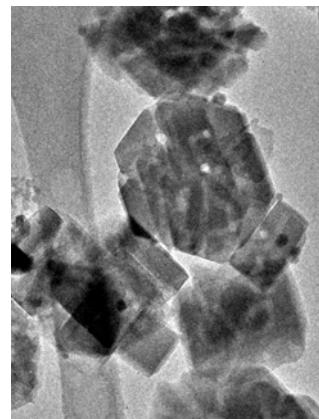
Hvad anvendes zeolitter til?

Man har fundet utallige anvendelser for zeolitter, bl.a. som ionbytter/blødgørere i vaskepulver, som molekyler si til molekyelseparation, som tørremiddel og til adsorption af andre molekyler end vand. Zeolitterne kan også anvendes som katalysatorer til f.eks. petrokemisk cracking. Her udnyttes zeolitternes syreegenskaber, deres store overfladeareal og porestrukturens selektivitet overfor reaktanter og produkter.



Figur 7a. TEM-billede af en mesoporøs énkrystal ca. $1,5 \times 2 \mu\text{m}$ af zeolitten Silicalite fremstillet med carbon black som kulmatrix.

Figur 7b. TEM-billede af mesoporøse énkrystaller af zeolitten Silicalite fremstillet med carbon nanorør som kulmatrix. Den sekskantede krystal i midten er ca. $200 \times 230 \text{ nm}$.



disse mesoporer er, ligesom nanorørene der dannede dem, ca. 10 nm.

Ved de nuværende syntesemetoder ligger mesoporerne formet af nanorørene helt tilfældigt inden i zeolitten, da det ikke er muligt at ensrette nanorørene under zeolitsyntesen. I fremtiden vil der måske udvikles en metode til dette, hvilket kan skabe zeolitter med mange forskellige egenskaber. Man kunne f.eks. forestille sig at skabe en zeolitkatalysator, der havde mikroporer i den ene retning af krystallen, mens der vinkelret på denne retning er dannet lige, parallelle mesoporer. Mange zeolit typer besidder kun et mikroporesystem i én retning af krystallen, og indførelsen af mesoporer ville derfor øge kontakten mellem zeolittens aktive sites og væskestrømmen af reaktanter til den katalyserede proces.

Design af nanomaterialer

Også andre materialer end zeolitter kan krystalliseres udenom carbon nanorør, f.eks. metaloxider såsom ZnO , ZrO_2 og TiO_2 . Det gøres ved at imprægnere carbon nanorør med vandige opløsninger af metalsalte efterfulgt af kalcinerings, hvorved metaloxiderne dannes. Dermed åbnes muligheder for at krystallisere mange forskellige materialer omkring forskellige kulstrukturer, hvilket skaber næsten uendelige muligheder i designet af mesoporer i katalysatorer m.m.

De mesoporøse zeolitter og metaloxider kan, ud over anvendelsen som katalysatorer, bruges til en slags støbeforme for andre materialer. Derved vil man opnå materialer med samme struktur som carbon nanorørene, der oprindeligt formede mesoporerne i krystallerne. Disse nanotråde kunne afhængigt af materialet vise sig at have mange interessante anvendelsesmuligheder, som man på nuværende tidspunkt kun kan gisne om.

Fremtiden

I løbet af de sidste ti år, efter Iijima opdagede carbon nanorørene, er der sket en rivende udvikling inden for kortlægningen af nanorørenes egenskaber og de mulige anvendelser af disse. Syntesemæssigt er man også blevet langt bedre til at styre, hvilken type (SWNT/MWNT) der dannes ved CVD, og muligheden for storproduktion af nanorør af høj kvalitet synes inden for umiddelbar rækkevidde. Endnu mangler dog særligt to ting for at udnytte nanorørs potentiale fuldt ud, nemlig muligheden for at styre den specifikke struktur og øge længden. Netop dette kan vise sig at være det sværeste problem at

løse og dermed måske den største udfordring for design af materialer på nanometerskala.

Imidlertid er vejen banet for fremstilling af en mangfoldighed af nye typer designede materialer. Med carbon nanorør som strukturdanner er det tilsyneladende kun fantasien, der sætter grænser for sammensætningen af fremtidens funktionelle nanomaterialer.

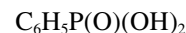
Referencer:

1. <http://members.tripod.com/marosso/fullerenes.htm> (31/7-2001)
2. G.Ertl, H.Knözinger, J.Weitkamp (Eds.), Preparation of Solid Catalysts, Wiley-VCH, 1999.
3. F.A.Cotton, G.Wilkinson, P.L.Gaus, Basic Inorganic Chemistry, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
4. L. Smart, E. Moore, Solid State Chemistry, An introduction, Stanley Thornes (Publishers) Ltd. 1995.
5. C.J.H. Jacobsen, J. Houzvicka, I. Schmidt, C. Madsen, A. Carlsson, *J. Am. Chem. Soc.*, 122, (2000), 7116-7117.
6. K. Wienberg, A. Krogh, K. Ståhl, I. Schmidt, M. Brorson, C. Madsen, C.J.H. Jacobsen, *Dansk Kemi*, 8, (2000), s. 20-25.
7. P.G. Collins, P. Avouris, *Scientific American*, Dec. (2000), s 38-45.
8. A. Jorio, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 6 (2001), s 1118-1121.
9. European Commission, Technology roadmap for nanoelectronics, 2. Ed., november (2000), Editor: R. Compañó.
10. K. Hirahara, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 85, 25 (2000), s 5384-5387.

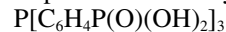
Nyt om fosfonsyre

Fosfonsyre er dss. hydridotrioxophosphorsyre
 P(H)(O)(OH)_2

Her kan det hydrogenatom, der er bundet direkte til phosphor substitueres med phenyl, så får man f.eks. (4-phenyl)phosphonsyre



Terrence L. Schull fandt på at fremstille syren



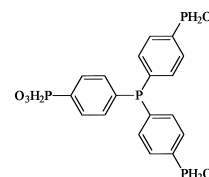
eller rettere dens natriumsalt



se figur.

Det forventes, at anionen i dette salt vil blive en meget studeret kompleksdanner.

Bos



2000: Water soluble triarylphosphines. *Chemical & Engineering News*. 11. september: 29.