

# Elektronik på molekyleskala

*Udviklingen inden for elektronikken er hastigt på vej mod det ultimative mål at lave elektroniske komponenter, der består af et enkelt molekyle.*

Af Kasper Nørgaard og Thomas Bjørnholm

■ Transistoren og det integrerede kredsløb var to af det 20. århundredes absolut største opfindelser, der tilsammen markerede startskuddet for dagens elektroniske tidsalder. I dag udgør millioner af silicium-baserede transistorer kernen i al moderne mikroelektronik, lige fra mobiltelefoner og musikafspillere til brødristerere og bærbare computere. Mikroelektronik fremstilles vha. litografiske

processer, hvor de elektriske kredsløb med ekstrem præcision bliver skåret og ætset ud af et enkelt stykke silicium. Over de seneste fem årtier er størrelsen på de enkelte elektroniske komponenter hastigt blevet mindre og mindre – en udvikling, der har resulteret i voldsomme forbedringer af elektronikens ydeevne og hastighed. Hvis udviklingen fortsætter som hidtil vil de elektroniske komponenter

inden længe være på størrelse med små molekyler (dvs. nogle få nanometer). Det er dog ikke muligt at nå denne længdeskala med dagens fremstillingsmetoder og materialer – dels bliver processerne stadigt mere teknisk krævende efterhånden som komponenterne bliver mindre, og dels bliver de langt dyrere. For at fortsætte udviklingen mod hurtigere og mindre elektronik er det derfor nødvendigt

at opfinde helt nye metoder til at fremstille og forbinde de elektroniske komponenter på nanoskalaen, samt nye materialer at lave dem af. Danmark er med blandt frontløberne i denne udvikling.

**Fra silicium til molekyler**  
Siden nanoteknologiens opblomstring har ansatte og studerende på universiteter verden over forsket i at fremstille

← Skematisk illustration af to nanoledninger af guld, forbundet til et enkelt molekyle.  
 (Illustration: Titoo Jain)

materialer med nye og spændende elektroniske egenskaber, samt at udvikle nye metoder til at bygge strukturer på nanometerskala. En del af denne forskning er rettet mod elektroniske anvendelser, og forskning i nanoelektronik breder sig traditionelt over mange faglige discipliner, og er ofte et tæt samarbejde mellem fysikere, kemikere og nanoteknologer.

Blandt de mest lovende bud på fremtidens elektronik på nanoskala er den såkaldte molekylære elektronik. Målet for denne teknologi er, på sigt, at erstatte Si-baserede elektroniske komponenter med nye materialer baseret på organiske molekyler, der dels er billigere at fremstille, lettere at håndtere og kan skræddersyes til forskellige anvendelser.

I kemilaboratoriet kan syntese-kemikere fremstille en lang række forskellige organiske molekyler med specifikke elektroniske egenskaber, der bl.a. kan designes til at efterligne traditionelle elektroniske komponenters funktioner, såsom ledninger, modstande, ensrettere (dioder) og transistorer. Ofte inkluderer disse molekyler en eller flere dobbeltbindinger mellem kulstof-atomerne (figur 1). I dobbeltbindinger (og f.eks. benzen-ringe) er elektronerne løsere bundet omkring atomkernerne, og udveksles derfor lettere med omgivelserne – en forudsætning for at skabe elektroniske kredsløb. Samtidig kan forskellige funktionelle grupper bygges ind i molekylerne (-NO<sub>2</sub>, -NH<sub>3</sub>, -SH, etc.) og påvirke de samlede elektroniske egenskaber.

Små organiske molekyler er

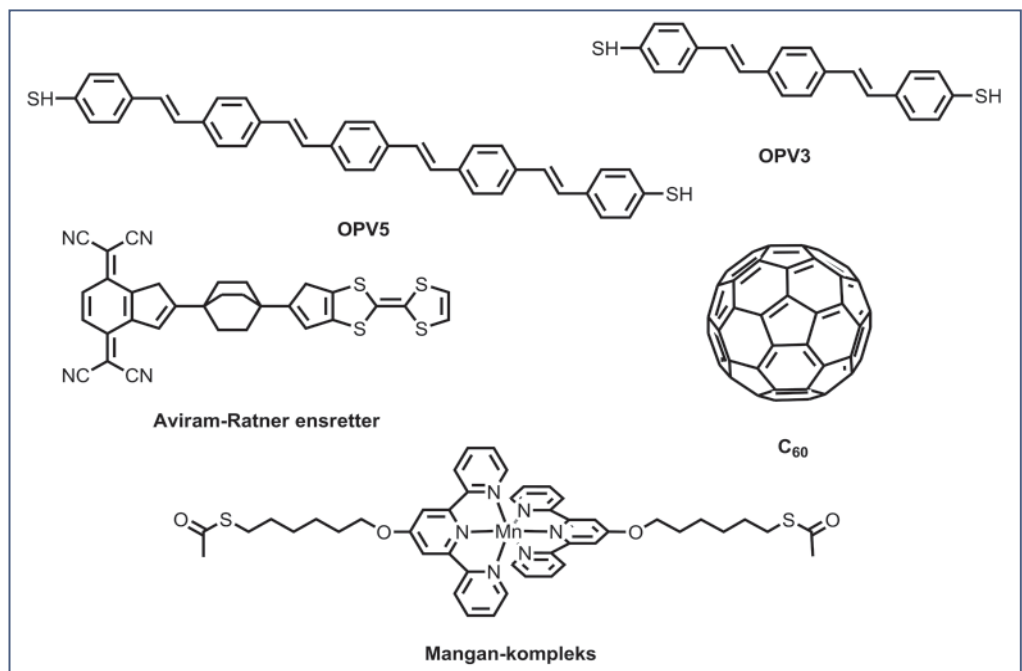
# Computeren krymper

Siden opfindelsen af det integrerede kredsløb i 1958 er antallet af elektroniske komponenter på den samme silicium-chip steget eksponentielt. Dagens computerprocessorer består f.eks. af omkring en milliard bittesmå transistorer, der hver især fungerer som en elektrisk kontakt og tilsammen udgør computerens elektriske kredsløb (en kontakt, der styrer en kontakt, der styrer en kontakt etc.). Jo flere transistorer en computer er bygget op af, des hurtigere og mere avanceret er den, og for at øge ydeevnen af næste generation af processorer, forsøger fabrikanterne hele tiden at finde metoder til at presse flere og flere transistorer sammen på den samme størrelse chip. Faktisk har udviklingen vist

seneste 50 år. Denne udvikling blev bl.a. observeret af Gordon Moore, der var en af grundlæggerne af chip-fabrikanten Intel, og han forudsagde allerede i 1965, at udviklingen ville fortsætte fremover. Denne forudsigelse er siden blevet kendt som "Moore's lov", og forventes at holde i hvert fald nogle år endnu.

Dagens mest avancerede mikrochips (2010) er baseret på 32 nm teknologien, dvs. de mindste elektroniske komponenter er i størrelsesordenen 32 nanometer, hvilket svarer til omkring 280 (kovalent bundne) Si-atomer lagt ved siden af hinanden. Næste generation af mikrochips vil basere sig på en 22 nanometer teknologi, og forventes på markedet senest i løbet af 2012.

at antallet af transistorer på en enkelt chip er blevet fordoblet ca. hvert andet år over de



Figur 1. Eksempler på molekyler der kan bruges i molekylær elektronik.

typisk i størrelsesordenen 2-3 nanometer, og altså betydeligt mindre end selv de mindste af dagens Si-baserede elektriske komponenter. Samtidig kan kemikerne fremstille en nærmest ufattelig mængde fuldstændigt ens molekyler, atom for atom, ofte i et antal omkring 1 mol (= 6 · 10<sup>23</sup> mole-

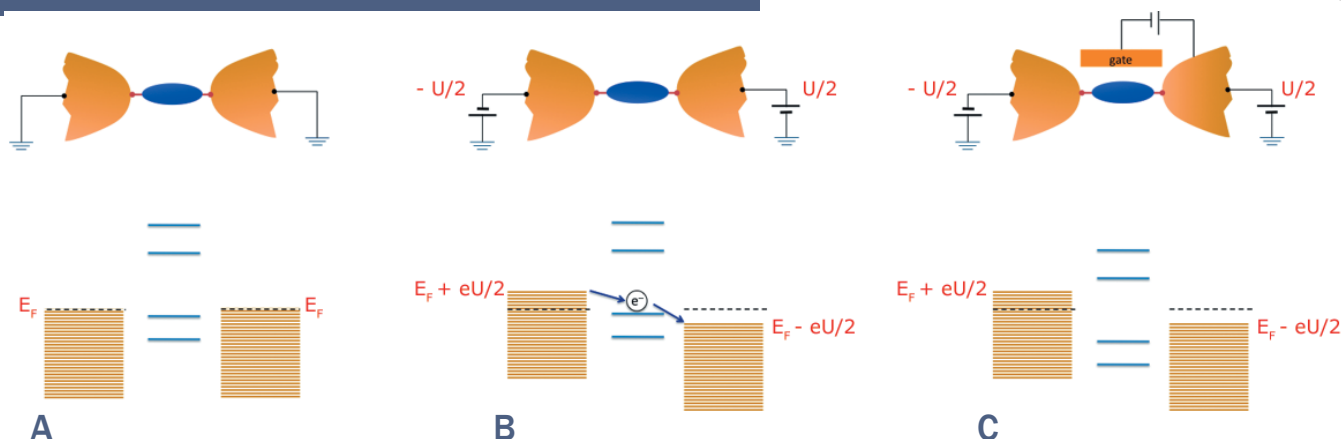
kuler, dvs. 600 trilliarder!).

Den ultimative grænse for nedskalering af elektroniske komponenter vil være nået når hver komponent består af blot ét enkelt molekyle. Dette mål er en af drivkræfterne bag udviklingen af molekylær elektronik, og et meget aktivt forskningsfelt i disse år.

### Elektronik på molekyleskala

Idéen om at udnytte de iboende egenskaber af enkelte molekyler til at efterligne funktionaliteten af forskellige elektroniske komponenter blev udtænkt allerede i 1974 af kemikerne Ari Aviram og Mark Ratner. På det tidspunkt var

## Elektrontransport igennem en molekylær transistor



Ligesom i et atom, befinder elektronerne i et molekyle sig i visse kvantiserede tilladte energitilstande kaldet orbitaler. Større molekylar har tættere liggende energitilstande end mindre molekylar. I meget store strukturer (f.eks. elektroder) ligger de tilladte energiniveauer så tæt, at de kan betragtes som værende kontinuerte (sammenhængende).

Dette er illustreret skematisk i figuren, der viser en elektrode-molekylelektrode struktur. Molekylelets energiniveauer består af visse (lettere simplificerede) diskrete tilstande. Energiniveauerne i metalelektroderne er fyldt op med elektroner indtil et vist niveau kaldet Fermienergien ( $E_F$ ), der repræsenterer de løsest bundne elektroner i elektroderne. Da  $E_F$  er den

samme for to ens elektroder, løber der ingen elektroner imellem dem (A). Hvis der derimod påføres en spændingsforskel  $U$  mellem de to elektroder vil Fermienergien forskydes med  $eU$ , og elektroner vil løbe fra elektroden med højere energi til elektroden med lavere energi. Dette kræver dog, at der er tilgængelige energiniveauer på molekylet, som elektronen først kan løbe over i (B). Tilføres en gate-elektrode til systemet, vil energiniveauerne i molekylet kunne forskydes uafhængigt af de to øvrige elektroder. Dermed kan niveauerne flyttes ud (eller ind) af området mellem  $E_{F1}$  og  $E_{F2}$  og dermed forhindre (eller tillade), at strømmen kan løbe mellem elektroderne (C). Derved har man fremstillet en enkelt-molekyle transistor.

det dog ikke muligt at efterprøve idéen i praksis, da der endnu ikke var udviklet teknikker, der var præcise nok til at forbinde et enkelt molekyle til eksterne målelektroder. For at kunne sende strøm igennem et enkelt molekyle, og for at kunne anvende det som en elektronisk komponent, er det nødvendigt at placere mindst to separate elektroder inden for ganske få nanometer af hinanden, således at molekylet kan blive fanget imellem dem. Samtidig er det vigtigt, at molekylet har elektrisk kontakt med begge elektroder, så elektroner fra den ene elektrode kan bevæge sig over på molekylet og efterfølgende videre over i den anden elektrode.

Først med udviklingen af nanoteknologiske teknikker er det blevet muligt at fremstille elektroder, der er små nok til at fastgøre og sende strøm igennem et enkelt molekyle.

Enkelt-molekyle elektronik er derfor stadig et meget ungt forskningsfelt, og hidtidige bestræbelser har først og fremmest drejet sig om at forstå de grundlæggende principper, der gælder for transport af elektro-

ner igennem molekylar. Ligesom i et atom, befinder elektronerne i et molekyle sig i visse diskrete, kvantiserede energitilstande kaldet orbitaler, der repræsenterer de eneste tilladte energiniveauer for elektronerne, og i modsætning til i traditionel elektronik spiller kvanteeffekter en stor rolle på molekyleskala. F.eks. kan en enkelt elektron, der tilføres eller fjernes, ændre systemet markant.

Når et enkelt molekyle er forbundet mellem to elektroder fungerer det i princippet som en molekylær ledning. Modstanden i denne ledning afhænger bl.a. af længden af molekylet og dets kemiske struktur. Det er også muligt at syntetisere molekylar, der fungerer som ensrettere (dioder). Disse molekylar vil have en kemisk struktur, der gør, at modstanden den ene vej gennem molekylet er meget mindre end den modsatte vej (figur 1).

### Transistorer – en udfordring

Endnu mere avanceret er en transistor, der fungerer som en elektronisk kontakt (tændt eller slukket). Transistoren er, som nævnt, fundamentet i al

moderne elektronik (en kontakt, der styrer en kontakt, der styrer en kontakt etc.). Derfor er udviklingen af en molekylar-baseret transistor en af de største og vigtigste udfordringer inden for molekylær elektronik. En transistor er sædvanligvis tilsluttet tre elektroder. Spændingen på den ene elektrode (kaldet *gate*-elektroden) afgør, om der kan løbe en strøm mellem de to øvrige elektroder (kaldet hhv. *source* og *drain*). Gate-elektroden afgør med andre ord om transistoren er "tændt" eller "slukket". (I en computer repræsenterer disse to tilstande hhv. de binære tal "1" og "0").

Forskere på Nano-Science Center ved Københavns Universitet er blandt de første i verden til at have udviklet og testet en transistor baseret på ét enkelt molekyle. Molekylet – en kort oligomer kaldet OPV (oligo-phenylenvinyl) – har en længde på bare 3,2 nanometer. Transistoren betjener sig af en meget lille strøm, idet strømmen løber ved at tilføre, eller fjerne, en enkelt elektron ad gangen.

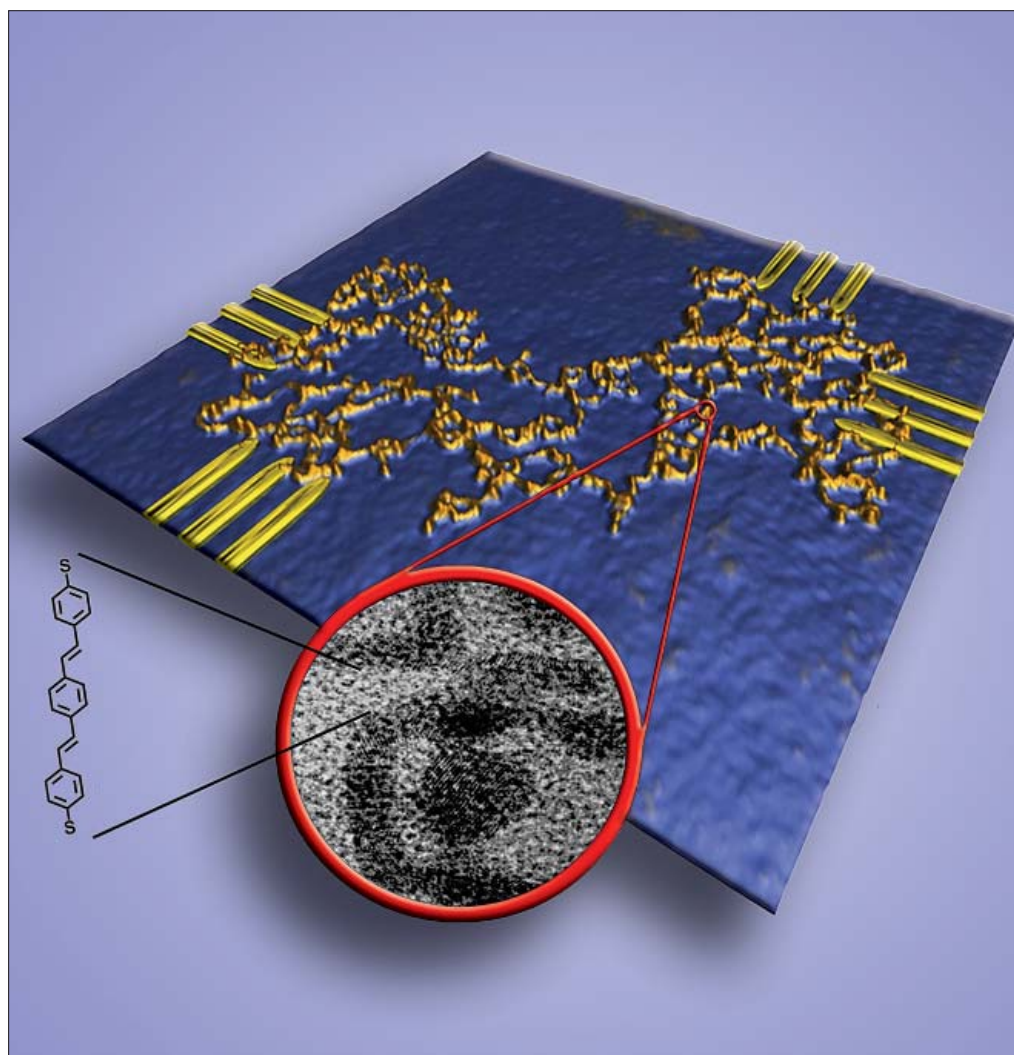
Endnu fungerer denne type

transistor kun ved meget lave temperaturer, tæt på det absolute nulpunkt, og udbyttet af virksomme transistorer er betydeligt under 100 %. En af de største udfordringer i de kommende år vil derfor være at fremstille molekylære transistorer, der er mere stabile og har bedre reproducerbarhed end tilfældet er i dag.

### Selvamlende kredsløb

Selvom det altså er muligt at fremstille en nano-transistor, der består af bare et enkelt molekyle, er der langt til de kredsløb bestående af millioner af transistorer som dagens silicium-baserede mikrochips er bygget op af. Da millioner molekylar ikke kan samles enkeltvis, er udvikling af molekylære elektroniske kredsløb derfor et næste, men også særdeles krævende skridt.

I modsætning til de litografiske teknikker, der fungerer oppefra-og-ned (også kaldet "top-down"), er udfordringen ved molekylære kredsløb at udvikle en metode, der fungerer nedefra-og-op ("bottom-up"). Med andre ord må molekylarne programmeres til at organisere



Figur 2. Selvorganiseret elektronisk kredsløb bestående af et netværk af sammenvoksede guld-nanopartikler i en lipidmatrix. Guldstrukturerne er forbundet med molekulære ledninger og strømmen gennem netværket måles med eksterne elektroder. (AFM og TEM billeder).

sig selv i velordnede mønstre. Molekylær selvorganisering opstår, når de enkelte byggesten (molekylerne) vekselvirker med hinanden på en sådan måde, at de tilsammen spontant danner mere ordnede strukturer. Selvorganiserende systemer er særdeles udbredt i naturen, hvor bl.a. foldning af proteiner eller dna-molekyler er velkendte eksempler. Cellemembraner er et andet klassisk eksempel, hvor lipid-molekyler (fedt) med et hydrofilt "hoved" og en hydrofob "hale" organiserer sig i dobbeltlag med de hydrofobe dele orienteret mod hinanden, og de hydrofile dele orienteret mod cellens vandholdige yder- og inderside.

Nano-Science Centers fors-

kere har gennem en årrække forsket i at designe selvsamlende molekulære elektroniske systemer. Et eksempel på dette er vist her på siden. Figur 2 viser et selvorganiseret molekulært kredsløb bestående af nanopartikler samlet til en kompliceret labyrintstruktur i en matrix af lipider. Små organiske OPV-molekyler forbinder de enkelte guldstrukturer, og hele kredsløbet kan let tilsluttes eksterne elektroder.

#### Mod fremtidens forbrugerelektronik

Praktiske anvendelser af enkeltmolekylær elektronik ligger endnu et stykke ude i fremtiden, men brugen af molekyler i elektronik er generelt i en rivende

udvikling. Organiske lys-emitierende dioder (OLEDs) er et eksempel på, hvordan organiske molekyler allerede i dag finder anvendelse i forbrugerelektronik, bl.a. som farvedisplays til mobiltelefoner og små fladskærmsfjernsyn.

Efterhånden som molekylær nanoelektronik udvikles og modnes, vil vi opleve, at teknologien vil brede sig til mange nye anvendelsesområder. Muligheden for at bygge elektronik med molekyler gør, at den f.eks. kan benyttes som sensorer i fødevareremballage, indbygges i tøj og tekstiler, eller som diagnostiske sensorer, der kan implanteres under huden, og overvåge en persons sundhedstilstand. ■

#### Om forfatterne:



Kasper Nørgaard er specialkonsulent og ph.d. E-mail: kn@nano.ku.dk



Thomas Bjørnholm er professor og centerleder E-mail: tb@nano.ku.dk

Begge ved Nano-Science Center, Københavns Universitet [www.nano.ku.dk](http://www.nano.ku.dk)

#### Videre læsning:

K. Nørgaard og T. Bjørnholm, *Supramolecular chemistry on water – towards self-assembly of molecular electronic circuitry*. *Chem. Commun.*, 2005, 1812-1823.

K. Moth-Poulsen og T. Bjørnholm, *Molecular electronics with single molecules in solid-state devices*. *Nature Nanotechnology*, 2009, 551-556.

[www.nanotek.nu](http://www.nanotek.nu)