

# Molekylær elektronik - elektronik i nanostørrelse

*Mads Brandbyge, Peter Bøggild, Joachim Fürst, Christian Kallesøe,  
Institut for Mikro- og Nanoteknologi*

*Jørn B. Hansen, Institut for Fysik*

*Kristian S. Thygesen, Center for Atomic-scale Materials Design, Institut for Fysik*

*Jens Ulstrup, Institut for Kemi*

Vi vænnet os til, at elektroniske apparater hvert år bliver mindre, hurtigere og har flere funktioner oven i købet uden at blive dyrere. Den utrolige udvikling skyldes, at det er lykkedes dygtige ingeniører at bygge elektronikkens arbejdshest - siliciumtransistoren - mindre og mindre. Faktisk er antallet af transistorer på computerens mikrochip blevet mere end fordoblet hvert 2. år de sidste 50 år! Desværre er vi ved at nå grænsen for, hvor meget mindre transistorer vi kan fremstille ved de traditionelle fabriktionsmetoder. Hvis vi gerne vil have mindre og hurtigere elektronik også i fremtiden, må vi opfinde nye metoder. Den sidste nye trend inden for elektronik kaldes for molekylær elektronik, hvor forskerne forsøger at udvikle kontakter af molekyler i nanostørrelse.

Vi er omgivet af elektronik i vores hverdag. Takket være telefoner og internet kan vi kommunikere 'online' med mennesker på den anden side af jorden. Skibe og fly styres af avancerede navigeringssystemer, læger udfører operationer med robotter, og selv skoleeleverne har skiftet blyant og kuglepen ud med computere. Samtidig har vi vænnet os til en udvikling, hvor elektroniske apparater hvert år bliver mindre, hurtigere og kan mere. Der er næppe mange mennesker, som ved deres fulde fem ville overveje at købe en computer i den tro, at den kunne holde de næste 10 år uden at være håbløst forældet. Men vil det også være sådan i fremtiden? Vi er ved at nå grænsen for den nuværende teknologiske udvikling, og hvis vi skal fortsætte udviklingen af elektronik, må vi opfinde helt nye måder at lave den på.

Elektronik handler om at flytte rundt på elektroner i et materiale ved hjælp af elektriske felter. Det fantastiske ved den udvikling, som vi har været vidne til i snart fem årtier, er, at det i alle årene har været de samme fysiske principper og det samme materiale, nemlig grundstoffet silicium, der lå bag teknologien.

Silicium bruges til at fremstille de mikrochips, som er inden i enhver computer. På hver eneste chip sidder der millioner af små elektriske kontakter (*transistorer*), der tilsammen udgør computerens elektriske kredsløb. Jo flere transistorer computeren har, desto hurtigere og mere avanceret er den. I de nyeste computere (2008) sidder der på hver af computerens mikrochips mere end én milliard transistorer, og på den næste generation af mikrochips bliver transistorerne så små, at der kan være mere end fire millioner af dem oven på det punktum, som denne sætning slutter med. Dette kapitel handler om elektronikkens udvikling, den klassiske transistors opbygning og funktion og forsøget på at bygge dens afløser, den molekylære transistor.

### Transistoren – opfindelsen, der ændrede verden

I 1957 fandtes der én computer i Danmark. Den blev kendt af befolkningen som 'elektronhjernen' ved folketingsvalget i 1960, hvor den udregnede valgprognoser. Maskinen, som blev kaldt DASK, vejede 3,5 tons, og fyldte en hel spisestue i en villa i Valby (*figur 1*). Dens afløser GIER, kom allerede i 1961. GIER fyldte 'kun' et klædeskab og var både hurtigere og brugte mindre strøm end DASK (*figur 1*). Forklaringen var, at GIER brugte *halvledertransistorer*, som var meget mindre end de klodsede og strømslugende radiorør i DASK.



*Figur 1. DASK (venstre) og GIER (højre). DASK vejede 3,5 tons og fyldte en hel spisestue. I 1961 kom afløseren GIER, der 'kun' fyldte et klædeskab og havde en hukommelse på 5.000 bytes (40.000 binære tal eller 5 KB). En almindelig pc i dag har adskillige gigabytes (GB).*

Transistorer er små elektriske kontakter, der tænder og slukker for strømmen. Computere regner i binære tal, det vil sige '0' og '1', og i computerens elektriske kredsløb repræsenteres '0' og '1' ved, at der er henholdsvis slukket og tændt for strømmen. Man kan derfor bruge transistorens tilstand til at repræsentere et binært tal, og ved at sætte mange transistorer sammen kan man bygge et elektrisk kredsløb, som udfører beregninger.

### Doping forbedrer halvledernes præstationer

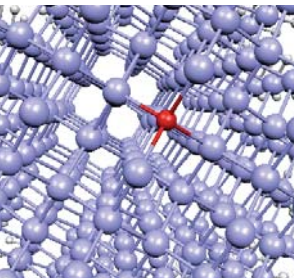
I de gammeldags radiorør blev elektronernes bevægelse i et lufttomt glasrør styret af elektriske felter imellem metalelektroder inde i røret (*figur 2*). Sådan havde man siden elektrens opdagelse i 1907 'tæmnet' elektronerne. I 1947 fandt fysikerne Bardeen og Brattain

ud af, at man kunne få elektronerne til at opføre sig på samme måde inde i et fast materiale – i en såkaldt halvlederkrystal. De erstattede altså glasrøret med et lille stykke krystal forbundet til tre metalelektroder. Den revolutionerende opfindelse blev døbt transistor (*figur 2*) og skaffede opfinderne nobelprisen i 1956. Vi vil nu kort se nærmere på transistoren, dens utrolige udvikling frem til i dag, og hvorfor den snart ikke kan blive mindre, inden vi kaster os over dette kapitels egentlige emne – nemlig forskningens bud på fremtidens elektronik.



*Figur 2. DASK brugte store 'radiatorrør' (venstre), som i GIER blev erstattet med de meget mindre transistorer (0,5 cm) (højre). Bemærk de tre ben på transistoren, som er metalelektroderne.*

Transistorens *halvlederkrystal* er typisk silicium (Si). Rene halvledere er grundstoffer, der hverken er et metal eller en *isolator*, og befinder sig i det periodiske systems fjerde hovedgruppe. De kaldes halvledere, fordi de ikke leder strøm nær så godt som et metal. Grunden er, at mens atomerne i et metal hver bidrager med én eller flere elektroner til den elektriske strøm, så er det kun en gennemsnitlig meget lille del af halvlederens atomer, der bidrager med elektroner til strømmen (for eksempel 1 ud af  $10^{10}$  atomer). Krystal betyder, at atomerne sidder regelmæssigt i en gitterstruktur (*figur 3*). Det fantastiske er, at selvom atomerne sidder med kun få tiendedele nanometers ( $10^{-9}$  m) afstand imellem sig, bevæger elektronerne sig ganske frit omkring inden i krystallen uden at støde ind i atomerne.



*Figur 3. Siliciumkrystalgitter. Afstanden imellem atomerne er 2,4 ångstrøm (Å) eller 0,24 nm. Hvert Si-atom er omgivet af fire naboer. Silicium har fire valenselektroner, og atomet deler således én elektron med hvert af sine naboatomer.*

Fordi atomerne i halvlederkrystallen kun afgiver få elektroner, må man forbedre halvlederen ved at tilføje den ekstra ladninger, som kan bidrage til den elektriske strøm. Det gøres ved at *dope* krystallen (på helt legal og sportslig korrekt vis). Ved at skyde fosforatomer (P), som har fem *valenselektroner*, ind i siliciumkrystallen kan man erstatte Si-atomer med P-atomer. Selvom P skal dele fire af sine valenselektroner med sine fire naboatomer, har den stadig én elektron tilovers. Den ekstra elektron kan flytte sig rundt i krystallen afhængig af de elektriske felter. Skyder man i stedet boratomer (B) ind i krystallen, opstår der et *hul* i form af en manglende elektron, eftersom B kun har 3 valenselektroner (*figur 4*).

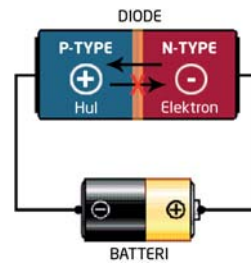
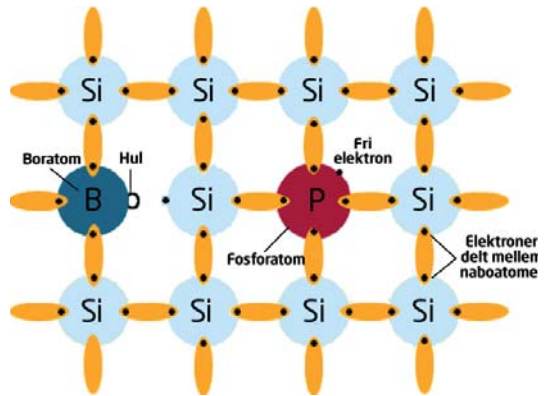
		P		N	
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

Figur 4. Doping. Grundstoffer fra hovedgruppe 3 i det periodiske system kan bruges som dopingatomer, der tilfører positiv ladning eller huller til siliciumkrystallen, fordi de kun har tre valenselektroner. Grundstoffer fra hovedgruppe 5 tilfører derimod negativ ladning på grund af deres fem valenselektroner.

Hullet kan også bevæge sig frit rundt i krystallen. Huller opfører sig som boblerne i champagne – det er nemmere at tænke på, at boblerne bevæger sig, end at det er al champagnen udenom boblen, som bevæger sig. Siliciumkrystallen kan på den måde fremstilles i to typer: *n-type* med ekstra elektroner (negative ladninger), eller *p-type* med huller (positive ladninger) (figur 5).

Figur 5. Siliciumkrystal dopet med B- og P-atomer. Man kan tilføje enten negative eller positive ladningsbærere til siliciumkrystaller ved at dope krystallen med henholdsvis B- eller P-atomer.

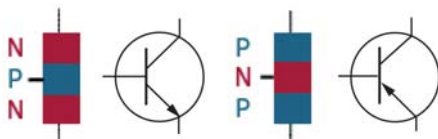
Sætter man en *n-type* sammen med en *p-type*, dannes der en *np-grænsovergang* i krystallen, som spærres for strømmen i den ene retning (når man forbinder *n* med minus og *p* med plus), og leder strøm i den modsatte retning. En krystal med en *np-grænsovergang* kaldes for en ensretter eller *diode* (figur 6).



Figur 6. Dioden er en ensretter, der kun lader strømmen løbe i en retning.

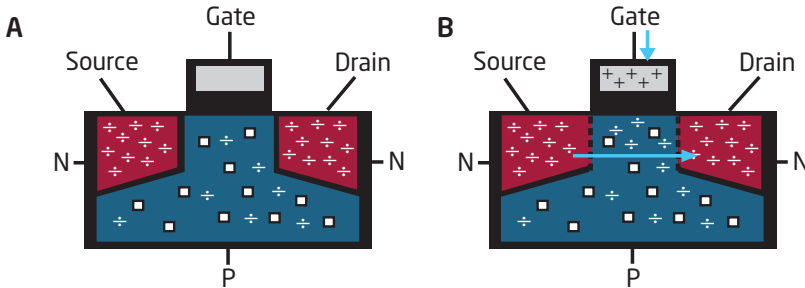
### Transistoren tænder og slukker for strømmen

En transistor består af tre lag sat sammen som enten en *NPN-* eller en *PNP-*'sandwich' (figur 7).



Figur 7. En transistor består af en 'sandwich' af enten *NPN-*lag eller *PNP-*lag.

Umiddelbart skulle man tro, at de tre lag ville blokere strømmen begge veje, og det er faktisk også tilfældet. Men hvis man påfører en lille strøm gennem en elektrode til laget i midten, løber der en meget større strøm gennem transistoren fra en elektrode i det ene omgivende lag til en elektrode i det andet. De tre elektroder kaldes for henholdsvis 'gate', 'source' og 'drain'. Gateelektroden påfører den lille strøm, der får den store strøm til at løbe mellem source og drain (figur 8). Ved at tænde og slukke for strømmen til gaten tænder og slukker man altså også for strømmen gennem transistoren, og derved får den sin tænd-sluk funktion.



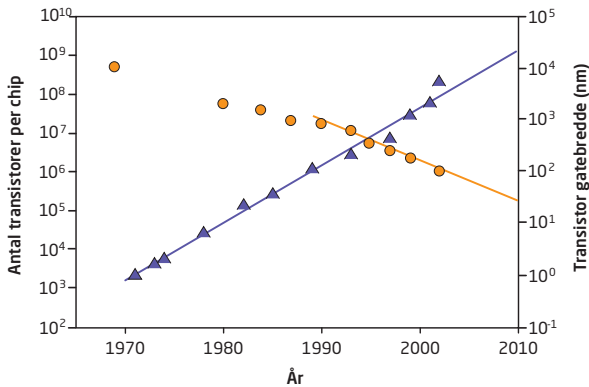
Figur 8. A. En halvledertransistor bestående af silicium med en sandwich-struktur: n-, p- og n-type samt tre elektroder: source, gate og drain. B. Ved at sætte en positiv spænding over gaten kan elektronerne trækkes fra source til drain via p-laget, som typisk er dopet med B-atomer, der laver 'huller', som elektronerne kan hoppe over i.

### Moore no more ...

GIER var udstyret med nogle få tusinde transistorer. De sad enkeltvis ved siden af hinanden på store plader sirligt forbundet til de andre komponenter med ledninger. Allerede i 1958 fandt en elektroingeniør fra Texas Instruments, Jack Kilby, ud af, at man kunne sætte transistorer ved siden af hinanden på det *samme* stykke siliciumkrystal og på den måde slippe for efterfølgende at skulle forbinde hver enkelt transistor til de øvrige elektriske dele. Jack Kilby havde opfundet det *integrerede kredsløb* og fik velfortjent nobelprisen i 2000.

Antallet af transistorer, som kunne presses sammen på et stykke Si, gik fra et par stykker i 1959 til 50 i 1965. En af grundlæggerne af Intel (mikrochipproducent), Gordon Moore, forudsagde, at antallet af transistorer per chip ville fordobles hvert år, da det ikke bare var fysisk muligt, men også en god forretning. Moores forudsigelse er siden blevet kendt som Moores lov (figur 9) og beskriver en teknologisk og økonomisk udvikling uden sidestykke i historien. Det mest utrolige er, at det samlede integrerede kredsløb ikke fylder ret meget mere end Kilbys første chip. Moderne transistorteknologi er allerede elektronik på nanometerskala.

Antallet og tætheden af transistorer er et godt mål for ydeevnen af en elektronisk komponent, for eksempel hastigheden af *processoren*, der udfører alle computerens beregninger. Jo tættere transistorerne sidder og jo mindre de er, des kortere afstand skal de elektriske signaler bevæge sig, og des hurtigere bliver processoren. Med stadig finere produktionsmetoder, som du kan læse om i kapitel 8, er det lykkedes at presse flere og mindre transi-



Figur 9. Moores lov. Grafens venstre y-akse viser stigningen i antallet af transistorer på én mikrochip (▲) fra 1970 til i dag. På højre y-akse ses udviklingen i bredden af transistorens gate, som i dag (2008) er cirka 50 nm (●).

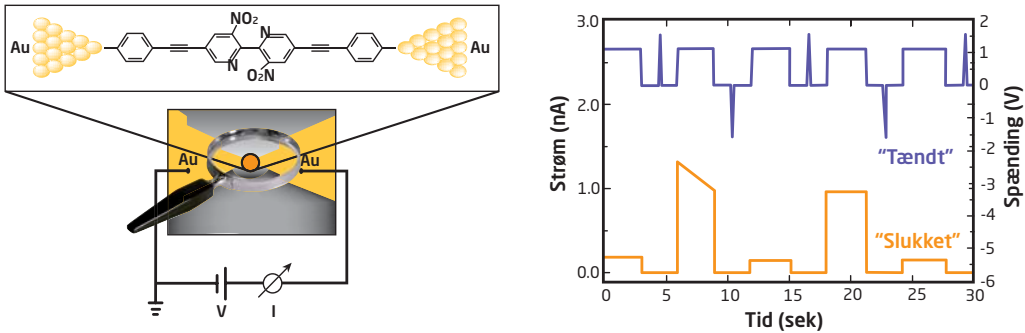
storer sammen på en enkelt chip. Men det kræver mere og mere opfindsomhed at takle de voksende problemer, som opstår, når chippene bliver så små.

Hvis vi tænker på en klassisk transistor, skal vi have en halvlederkrystal med dopingatomer. Det betyder, at der er en nedre grænse for, hvor lille transistoren kan blive. Til sidst består den af så få atomer, at opførslen af den enkelte transistor bliver et spørgsmål om der er eller ikke er et dopingatom til stede i den, og det går ikke. I industrien og på universiteterne forsker man derfor i nye metoder til fremstilling af siliciumtransistorer. Hvorfor ikke starte med de mindste byggesten til elektronik – de enkelte atomer – i stedet for krystallen? Den type elektronik kaldes for molekylær elektronik, og den skal vi nu se lidt nærmere på.

### Molekylær elektronik

Allerede i 1974 - længe før nogen var begyndt at tale om nanoteknologi – lavede de to amerikanske forskere Ari Aviram og Mark Ratner et tankeeksperiment, hvor et enkelt molekyle 'fanget' mellem to metalelektroder fungerer som en ensretter, der kun tillader strømmen at løbe i en retning.

I det følgende gennemgår vi en molekylær 'kontakt', som blev lavet i 2006 af en gruppe forskere fra IBM's laboratorium i Zürich. Kontakten, som er afbildet til venstre i figur 10, består af et organisk molekyle, som laver en kemisk binding med to guldelektroder. Ved at skabe en spændingsforskel mellem elektroderne kan man drive en strøm gennem molekylet, ganske som det er tilfældet med almindelige ledninger. Forskerne opdagede, at når de udsatte molekylet for en høj, kortvarig positiv spændingspuls (det vil sige øger spændingen på den ene side af molekylet i forhold til den anden), ændrede molekylets ledningsevne sig fra lav til høj. Hvis de derefter udsatte molekylet for en negativ spændingspuls, vendte dets ledningsevne tilbage til det oprindelige lave niveau. Ved hjælp af spændingspulser kunne forskerne altså skifte molekylets elektriske ledningsevne mellem to tilstande: høj og lav (figur 10 højre). Denne egenskab svarer til en almindelig elektrisk kontakt, der tænder og slukker for strømmen, og derfor kaldes molekylet for en molekylær kontakt. I en computer kan kontakten bruges som transistor, der repræsenterer de to binære tal '0' og '1'. Det unikke ved den molekylære kontakt, ud over dens minimale størrelse, er, at den i modsætning til nutidens kontakter, der består af flere separate dele, har tænd-sluk mekanismen indbygget i sig: molekylet er selve kontakten.



Figur 10. IBM's molekylære kontakt. Til venstre ses molekylet, som er 'fanget' mellem to guldelektroder, der er tilsluttet en spændingskilde, der gør det muligt at sende strøm igennem molekylet. Til højre ses en måling af molekylets skiftende ledningsevne. De skarpe blå spidser svarer til positive (op) eller negative (ned) spændingspulser, som ændrer molekylets tilstand. Den gule kurve viser, hvordan molekylets ledningsevne ændres mellem høj (on) og lav (off), hver gang molekylet udsættes for en spændingspuls.

På nuværende tidspunkt ved forskerne faktisk ikke, hvorfor molekylet ændrer ledningsevne, når det udsættes for en høj spændingspuls. En mulighed er, at molekylet ændrer sin geometriske form, som så påvirker dets ledningsevne. Det vender vi tilbage til. Uvisheden illustrerer godt, at nanoelektronik som teknologi stadig er på fosterstadiet og først og fremmest er et forskningsfelt. Den molekylære kontakt, det vil sige to metalelektroder forbundet af et molekyle eller en anden nanopartikel, er et af de mest centrale begreber i nanoelektronikken. Vi vil nedenfor se nærmere på, hvordan elektrisk strøm, eller rettere sagt elektroner, bevæger sig gennem en sådan kontakt.

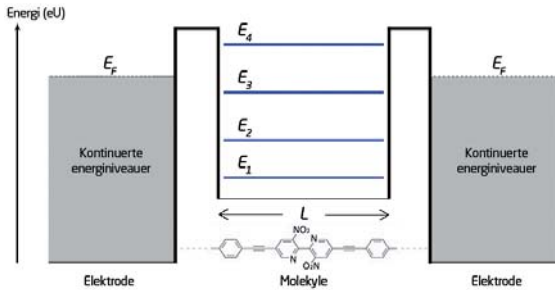
### Lidt om kvantemekanik

For at kunne beskrive de grundlæggende principper bag elektrontransporten i en molekylær kontakt må vi kende lidt til to begreber fra den kvantemekaniske beskrivelse af elektroner: *energitilstande* og den *kvantemekaniske tunneeffekt*.

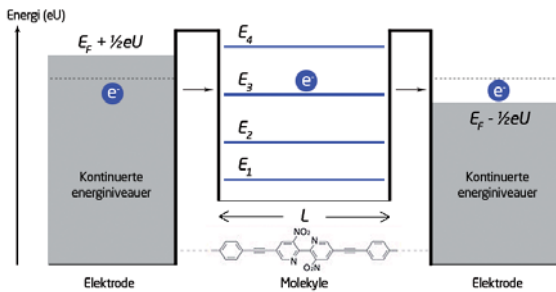
*Energitilstande:* Elektronerne i et atom kan kun bevæge sig om atomkernen i visse baner med ganske bestemte, adskilte, diskrete eller kvantiserede energier  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_x$ . Elektroner i et molekyle er underlagt samme lov, om end banerne her er meget mere komplekse. En meget simpel beskrivelse af et molekyle i den molekylærelektroniske kontakt er vist i figur 11. Molekylets energiniveauer er vist i midten og understreger, at kun bestemte, adskilte eller diskrete energier er tilladte. Vi kan notere os, at jo større molekylet er, des tættere ligger energiniveauerne. De omgivende metalelektroder (se også figur 10) er selvfølgelig også opbygget af atomer og kan derfor ansues som meget store molekyler. Det betyder, at afstanden mellem energiniveauerne i metalelektroderne er forsvindende små og i praksis 'smelter' sammen til et sammenhængende eller kontinuert energiniveau.



Figur 11 viser en meget vigtig ting. Energieniveauerne i et system som elektroderne er fyldt op med elektroner. Den løse bundne elektron i hver elektrode har en energiværdi, som vi kalder Fermienergien,  $E_F$ . To ens elektroder af samme materiale har ens Fermienergien, og der løber derfor ingen elektroner fra den ene til den anden elektrode. Men hvis vi påfører systemet en spændingsforskel  $U$ , forskydes Fermienergien for de to elektroder med energien  $eU$  (figur 12). Herved løber der en elektrisk strøm fra elektroden med den højeste Fermienergi til elektroden med lavest Fermienergi.

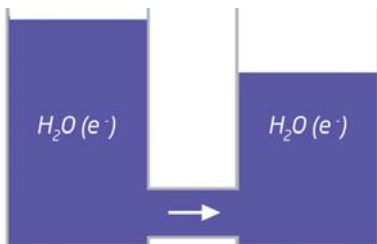


Figur 11. Skematisk billede af molekyle med diskrete energiniveauer ( $E_1, \dots, E_4$ ) mellem to metalelektroder med kontinuerte energiniveauer. Elektroderne er fyldt op med elektroner til Fermienergien  $E_F$ .



Figur 12. Spændingsforskellen  $U$  mellem elektroderne forskyder elektrodernes Fermienergien med energien  $\frac{1}{2}eU$  i forhold til hinanden, hvor  $e$  er elektronens elektriske ladning. Strømmen igennem den molekylære kontakt afhænger af, at 1) molekylet har energiniveauer med energier mellem  $E_F + \frac{1}{2}eU$  og  $E_F - \frac{1}{2}eU$ , 2) antallet af energiniveauer og 3), hvor ofte elektronerne hopper gennem energibarrieren, det vil sige molekylet.

Man kan sammenligne elektronstrømmen mellem elektroderne med to forbundne vandkar. Hvis vandstanden i de to kar er lige høj, er der ligevægt, og der løber ingen vand. Hvis vi ændrer vandstanden i det ene kar, så der opstår en højdeforskel, løber vandet nu fra karret med den højeste vandstand til karret med den laveste (figur 13).



Figur 13. Forbundne kar. Højdeforskellen i vandstanden svarer til forskellen i Fermienergien for de to elektroder. Vandet - eller elektronerne - løber fra det højeste til det laveste niveau.

**Tunneleffekten:** Det andet centrale begreb i forståelse af elektrisk strøm nede på det enkelte molekyles niveau er den kvantemekaniske tunneleffekt. Tunneleffekten er et højt ejendommeligt fænomen, som kort fortalt betyder, at en elektron kan bevæge sig igennem en energibarriere, som er højere end elektronens samlede energi. I klassisk fysik er dette

umuligt, det svarer til at sparke en fodbold igennem en mur, men i kvantemekanikken er der en endelig sandsynlighed for, at en elektron fra venstre elektrode i *figur 11 og 12* kan nå frem til højre elektrode, selvom den undervejs skal over en energibarriere (mur) (*boks 1*). Energibarrieren skyldes, at der er en modstand i samlingerne mellem molekylets ender og de to elektroder, markeret ved de tykkere sorte streger mellem elektroder og molekyle i *figur 12*.

Tunneleffektens kvantemekaniske love angiver en nøje sammenhæng mellem *tunneleeringsstrømmen* og egenskaber ved den energibarriere, som molekylet i *figur 12* udgør. Vi kan for eksempel se i *boks 1*, at tunneleringsstrømmen  $T$ , det vil sige den molekylære elektriske strøm, afhænger eksponentielt af molekylets energiniveauer  $E_i$  (ikke at forveksle med  $E_i$  på *figur 11 og 12*). Netop denne hyperfølsomhed mellem elektrisk tunneleringsstrøm og ydre kontrol, i form af den spændingsforskel vi påfører systemet, er grundlaget for, at elektronikken kan bringes helt ned på det enkelte molekyles niveau.

## Boks 1. Tunneleffekten

### I den klassiske verden:

- Hvis elektronens energi  $E_i > \text{energibarrierens højde } V_0$ , hopper partiklen *over* barrieren
- Hvis elektronens energi  $E_i < \text{energibarrierens højde } V_0$ , hopper partiklen *tilbage* fra barrieren

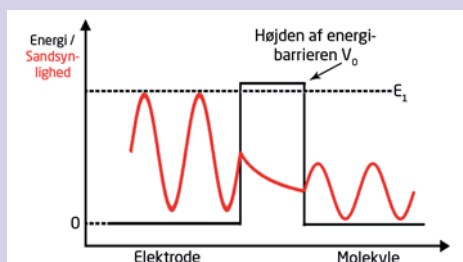
### I kvanteverdenen:

- Når  $E_i$  er større end  $V_0$ : Som i den klassiske verden
- Når  $E_i$  er mindre end  $V_0$ : Partiklen kan trænge igennem barrieren

Der er altså altid en vis sandsynlighed for at finde elektronen på den anden side af barrieren, bestemt ved ligningen:

$$T \propto \exp\left(-2 \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \pi^2 \cdot M \cdot a^2 \cdot (V_0 - E_i)}{h^2}}\right)$$

hvor  $T$  er tunneleringsstrømmen,  $M$  er elektronens masse,  $a$  er bredden af energibarrieren (= molekylets længde), og  $h$  er Plancks konstant (=  $6,63 \times 10^{-34}$  Js).



Figuren herover viser sandsynligheden for at finde en elektron på henholdsvis elektroden og molekylet, det vil sige sandsynligheden for, at elektronen passerer igennem energibarrieren.

## Elektrisk strøm gennem molekyler – hvad har vi lært

For at opsummere de sidste afsnit kan vi altså konkludere følgende:

- Der kan kun løbe en strøm gennem den molekylære kontakt, hvis der er et energiniveau på molekylet med en energi, der ligger mellem  $E_F - \frac{1}{2}eU$  og  $E_F + \frac{1}{2}eU$  (figur 12).
- Strømmens størrelse afhænger af antallet af energiniveauer mellem  $E_F - \frac{1}{2}eU$  og  $E_F + \frac{1}{2}eU$ , det vil sige, hvor mange elektroner der er plads til ad gangen på molekylet, samt af hvor ofte elektronerne hopper gennem energibarrieren.

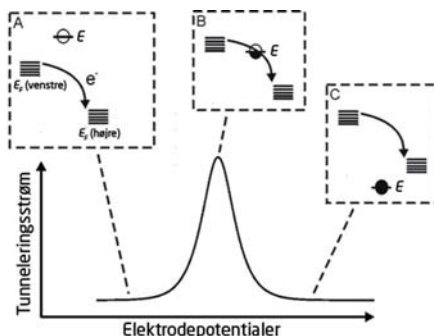
Som nævnt er sidstnævnte givet ved den kvantemekaniske tunneleffekt. Hvis molekylet ændrer sin geometriske form, for eksempel sin længde, ændrer energiniveauerne og dermed den elektriske ledningsevne sig også, som vi så i boks 1. Dermed har vi forklaringen på, hvordan en geometrisk ændring af IBM-molekylets form kan være forklaringen på dets kontaktegenskaber.

## Molekylære kontakter

Med disse begreber i hånden kan vi nu vende os mod beskrivelse af elektrontransport i den molekylære kontakt. Enkelte molekyler kan altså bringes til at lede elektrisk strøm ved den kvantemekaniske tunneleffekt. Det samme princip er baggrunden for *Skanning Tunnel Mikroskopet* (STM), som du kan læse om i kapitel 2. Hvis vi ønsker, at molekylet skal indgå som komponent i ny nano- eller molekylærelektronik, må vi imidlertid kombinere tunneleffekten med andre molekylære egenskaber, der kan tilføje ensretter- og forstærkerfunktioner samt andre egenskaber kendt fra den mere etablerede mikroelektronik.

Som vi så tidligere, har traditionelle transistorer en elektrode mere end den molekylære kontakt. Den tredje elektrode er gaten, som gennem en lille strøm tænder og slukker for den store strøm, der på grund af spændingsforskellen mellem source og drain løber igennem transistoren. Transistorens forstærkning svarer til den strømforøgelse, der vindes ved at åbne gaten. En meget spændende opdagelse er, at elektronik i molekylær skala også kan udvise tre-elektrode forstærkning.

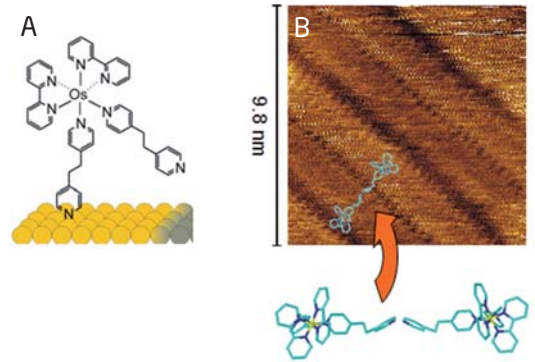
Som allerede nævnt kan der ikke forekomme transport af elektroner gennem den molekylære kontakt, hvis molekylets energiniveauer ligger enten over eller under begge elektrodernes Fermienergier (figur 14A og C). Hvis vi benytter en spændingskilde svarende til gatespændingen, kan vi imidlertid bringe et eller flere af molekylets energiniveauer ind



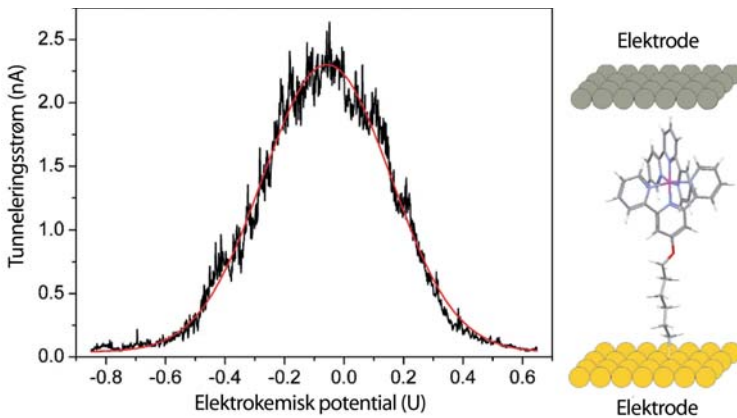
Figur 14. Tunneleringsstrømmens variation, når de to elektrodepotentialer ændres samtidigt i forhold til molekylets referenceelektrodepotential. Når et eller flere af molekylets energiniveauer ( $\bullet$  E) ligger imellem elektrodernes Fermienergier løber, der en strøm (toppen på kurven) gennem molekylet.

Figur 15. A. Osmiumkompleks, der 'står på ét ben' på en plan guldoverflade. B. SEM-billede af et molekylært enkeltlag af osmiumkomplekset.

mellem Fermienergiene. Det betyder, at elektronerne i venstre elektrode nu kan hoppe ind i tomme energiniveauer i molekylet og dernæst videre ind i tomme energiniveauer i den højre elektrode (energiniveau  $E_5$  i figur 12 og figur 14B). Forholdet mellem gatespændingen og strømmen gennem molekylet giver derfor elektronisk forstærkning i et snævert gatespændingsområde. Dette er præcis kravet til en transistor i molekylær skala.



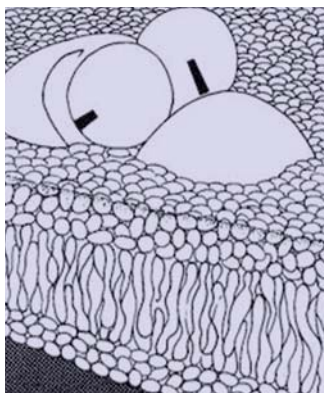
Det viser sig, at molekyler, som kan oxideres eller reduceres, udviser de ønskede forstærker- og ensrettereigenschaften, som det kræves af en molekylær kontakt. Et eksempel på den type molekyler er metalkomplekser af ædelmetallet osmium (Os), som er særligt velegnet til molekylær elektronik, fordi de danner ordnede enkeltlag på gul- og platinoverflader (figur 15A og B). Figur 16 viser osmiumtransistorens forstærkereffekt ved en given gatespænding.



Figur 16. Grafen til venstre viser den elektriske strømforstærkning af et osmiumkompleks spændt ud mellem to metalelektroder (højre).

## Selvsamlende elektronik

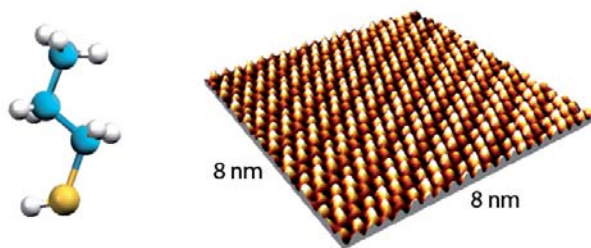
Som de sidste afsnit viser, kan nanoelektronisk transistor- og ensretterfunktion helt nede på det enkelte molekyles niveau godt lade sig gøre. Men én molekylær transistor gør det ikke alene. Microchips i elektronik består af millioner af transistorer sat sammen i komplicerede elektriske kredsløb. Udvikling af molekylære elektroniske kredsløb er derfor det næste, men også langt mere krævende skridt. Millioner af molekyler kan naturligvis ikke samles enkeltvis. I stedet må molekylerne stimuleres til at samle sig af sig selv i velordnede mønstre, og her kommer naturens egne byggemetoder os heldigvis til hjælp.



Figur 17. Skematisk fremstilling af en biologisk cellemembran opbygget af dobbeltlag af selvsmalende molekyler med et hydrofilt 'hoved' og en hydrofob 'hale'. Et stort proteinkompleks er indbygget i membranen.

Naturen benytter sig i høj grad af selvsmalende systemer, det vil sige systemer, der organiserer sig selv uden styring udefra. Selvsmalningen opstår, når molekyler passer så godt sammen, at de, hvis de befinder sig i nærheden af hinanden, spontant danner en fælles struktur. Et velkendt eksempel på selvsmalning er foldning af DNA-molekylet. Et andet eksempel er cellers membraner, der er opbygget af parallelle langstrakte molekyler med et *hydrofilt* 'hoved' og en *hydrofob* 'hale', der organiserer sig i to ens lag med hvert lags hydrofobe ender gemt i midten af dobbeltlaget og de hydrofile ender stikkende ud mod henholdsvis cellens vandige inder- og yderside. Samtidig indbygges for eksempel de store fotosyntetiserende proteinkomplekser med raffinerede elektroniske funktioner af stor betydning for nanoelektroniske overvejelser (figur 17). Selvsmalning som fremstillingsmetode kaldes også for 'bottom-up'-metoden, som du kan læse om i kapitel 8 om nanofabrikation.

Vi har allerede set et eksempel på selvsmalende molekyler, nemlig Os-komplekserne, der samler sig i elektroniske molekyllære enkeltlag. Figur 18 viser et andet eksempel, molekylet butanthiol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SH}$ ) på en overflade af guld. Butanthiol er en alkanthiol, det vil sige en lang carbonkæde med en thiolgruppe (-SH) i enden. Svovl er velegnet i selvsmalende systemer, fordi det binder let og stabilt til guld. Desuden bliver alkanthiollaget kun et enkelt molekyle tykt, fordi carbonkæderne ikke kan sætte sig sammen til lange kæder, men udelukkende danner bindinger mellem thiolgruppen og det underliggende ædelmetal. På den måde kan man fremstille selvsmalende lag af blot få nanometers tykkelse. Molekyllær selvsmalning bliver afgørende for udviklingen af nanoelektronik.



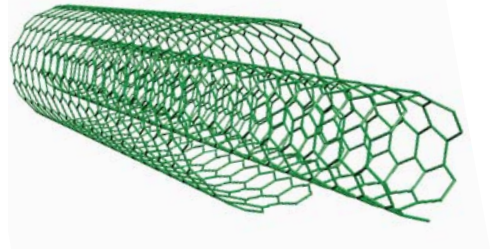
Figur 18. Venstre: Molekylet butanthiol, en ligekædet alkan med fire carbonatomer (blå) bundet til hydrogen (hvide) og en thiolgruppe (gul), der får molekylet til at hæfte godt på en guldoverflade. Højre: STM-billede af butanthiol (lyse pletter) på en guldoverflade.

### Nanoledninger: rør og tråde

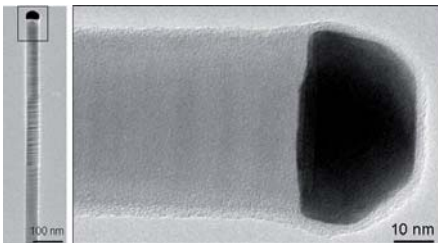
Vi har nu set på den molekyllære elektriske kontakt og hvordan millioner af disse kan samles i molekyllære enkeltlag ved hjælp af selvsmalning. Næste skridt i fremstillingen af et molekyllært elektrisk kredsløb er at forbinde molekylerne med nanoledninger lavet af eksempelvis nanorør eller -tråde.

*Carbonnanorør* (CNR) består af et eller flere *grafitlag* rullet sammen til rør (*figur 19*). Et CNR er cirka én nanometer i diameter, men kan være op til flere centimeter lange og har desuden nogle helt unikke egenskaber. For eksempel er de lige så stive som diamanter, 1000 gange stærkere end stål, men med en massefylde på blot en femtedel. Rørene er også fantastiske til at lede strøm, op til 1000 gange bedre end sølv og kobber, og meget korte rør leder strøm helt uden modstand. Disse egenskaber betyder, at nanorør er meget velegnede som molekylære ledninger i computere. Nanorørene er desuden ligesom de molekylære kontakter et alternativ til de nuværende transistorer. Flere forskningslaboratorier har allerede bygget transistorer af CNR, og disse har vist sig både at være langt mindre og mere følsomme end nutidens transistorer og bliver desuden ikke varmet op i samme grad. Det sidste skyldes den lave modstand i rørene.

*Figur 19. Carbonnanorør består af et eller flere lag grafit foldet på forskellige måder eller uden på hinanden. De sidste kaldes for flervæggede nanorør. På billedet ses et dobbeltlaget nanorør. Afstanden mellem de enkelte atomer er blot 0,14 nm.*

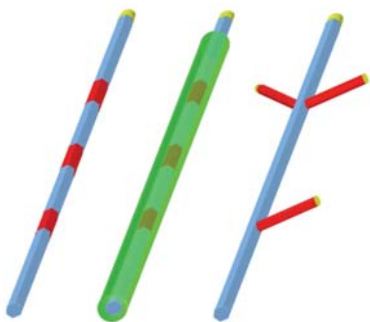


*Nanotråde* er i modsætning til nanorørene ikke hule, men deler alligevel mange af de unikke elektriske, optiske og mekaniske egenskaber, som rørene har, og man kan lave tråde, der er velegnede i lysdioder, computere eller til sensorer. Nanotråde af halvleder-materialer har diametre fra 100 og helt ned til ganske få nanometer, hvorimod længden typisk er i størrelsesorden af mikrometer ( $10^{-6}$  m) (*figur 20*). De mest benyttede materialer til nanotråde er silicium, germanium samt de såkaldte III-V og II-VI materialer (grundstoffer fra hovedgruppe 3 og 5, samt 2 og 6), eksempelvis galliumarsenid (GaAs) (III-V) og zinkoxid (ZnO) (II-VI).



*Figur 20. Venstre: Transmissions Elektronmikroskop-billede (TEM) af en nanotråd lavet af galliumfosfat (GaP) og galliumarsenid (GaAs). På billedet til højre ses enden af tråden oven på en katalytisk guldpartikel (sort), som tråden er 'vokset' op fra.*

En stor fordel ved nanotråde er de mange parametre, man kan kontrollere under dyrkingen. For eksempel kan man flette forskellige materialer ind i tråden og dermed ændre trådens elektriske egenskaber. Man kan også fremstille forgrenede tråde ved at sætte nye katalytiske partikler på allerede færdige nanotråde (*figur 21*).



Figur 21. Illustrationer af forskellige typer nanotråde (fra venstre mod højre): Heterostruktur (tråd af flere forskellige materialer), skalstruktur (forskellige materialer uden på hinanden) samt en forgrenet nanotråd, et såkaldt 'nanotræ'.

De utallige dyrkningsmuligheder for nanotråde betyder, at mange forskere betragter trådene som en vigtigere del af fremtidens elektronik end nanorør. Det kræver dog, at forskerne får endnu bedre kontrol over fremstillingsmetoderne og bliver bedre til at bygge trådene sammen med eksisterende siliciumbaseret elektronik.

## Fremtidens nanoelektronik

Det er endnu for tidligt at sige, hvordan fremtidens elektronik kommer til at se ud, men en ting er sikkert: Udviklingen vil fortsætte i retning af mindre og hurtigere komponenter og kredsløb så længe som muligt. I dette kapitel har vi set eksempler på molekylære kontakter, selvsamlende molekyler, nanorør og -tråde. Andre forskere forsøger at udvikle ny elektronik ved at udnytte ikke bare elektronens ladning, som vi har talt om hidtil, men også dens *spin*. Du kan læse mere om spintronik i boks 2.

I takt med at molekylær- og nanoelektronik vinder indpas, vil elektronik, eksempelvis sensorer, bliver bygget ind i mange flere hverdagsgenstande som tøj, køleskabe og sportsudstyr og sågar mennesker og dyr. Et eksempel kunne være en chip, der hjælper nervesystemet med at undertrykke Parkinsons syge, eller det kunne være tusinder af nanochips, der advarer om slid eller brud på eksempelvis broer eller tage, før de styrter sammen. Mikroelektronik og informationsteknologi har allerede ændret verden, og nanoelektronikken har et stort potentiale for at fortsætte denne forandring.

### Boks 2. Spintronik

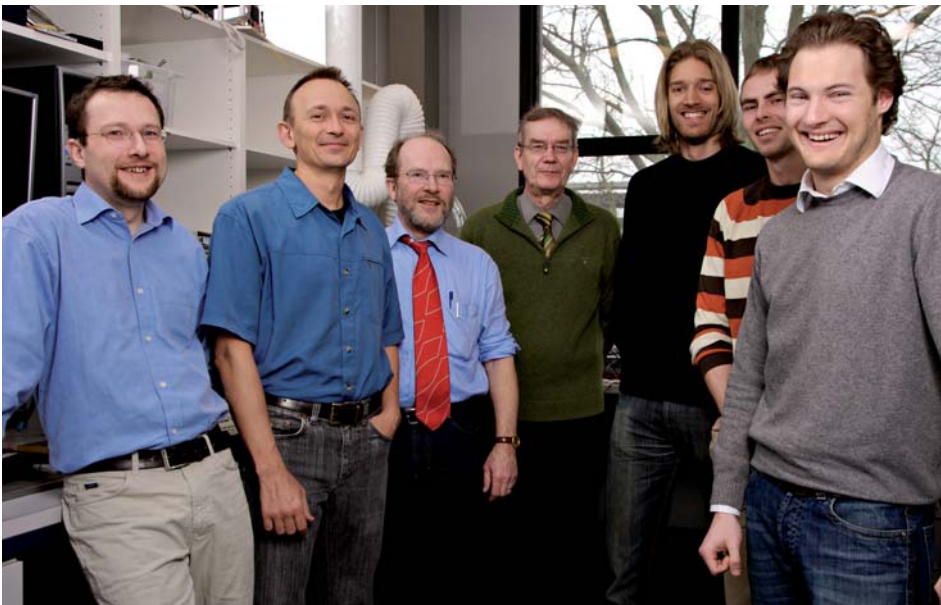
Elektronens magnetfelt beskrives kvantemekanisk som en egenskab ved elektronens spin. Det var Heisenberg og Dirac, der fra midten af 1920'erne førte an i udviklingen af teorien for de magnetiske egenskaber. I 1988 udviklede to europæiske forskergrupper ledet af henholdsvis Albert Fert og Peter Grünberg såkaldte spinventiler med 'Giant Magnet Resistance' effekt = GMR-effekt. De første spinventiler bestod af mange tynde lag af jern og krom. Magneto-resistanseffekten ses som en kraftig forøgelse af modstanden, når jern-krom lagene anbringes i et magnetfelt, altså en magnetfeltsensor. Senere er der udviklet endnu bedre GMR-spinventiler med tunnelbarrierer.

Den banebrydende opfindelse, som indbragte Fert og Grünberg nobelprisen i fysik i 2007, har på forbløffende kort tid fundet udbredt anvendelse i meget små læsehoveder til harddiske, hvor GMR-sensorer har gjort det muligt at pakke de magnetiske bits betydeligt tættere sammen. Brugen af GMR-læsehoveder vil gøre det muligt over de

næste 5 år at øge tætheden på harddiske fra de nuværende 20 GB per kvadratcentimeter til over 200 GB per kvadratcentimeter.

Egentlig spintronik hukommelselementer er også blevet udviklet, de kaldes MRAM (Magnetic Random Access Memory) og har den fordel, at hukommelsen ikke forsvinder, når computeren slukkes. En computer eller en mobiltelefon med MRAM er øjeblikkeligt klar til brug, når du trykker på 'ON'! Udviklingen går i spiral: en af de tidligste former for hukommelse i elektroniske regnemaskiner bestod af et netværk af ringformede magneter med (mindst) to læse-/skriveledninger gennem hver ring ('ferritring-lager'), som man vender tilbage til med MRAM.

Spintronik er også på vej ind i enkelt-atom og molekylær elektronik, hvor tunnelbarrieren består af et molekyle, et nanorør eller en nanotråd. Om tyve år kan den hurtigste og mest følsomme elektronik meget vel bestå af molekulære spintransistorer. Også på dette ekstreme nanoniveau drejer det sig om at bruge spinnets, elektronens uudnyttede ressourcer.



Kapitlets forfattere. Fra venstre: Lektor Mads Brandbyge, Lektor Peter Bøggild, Docent Jørn B. Hansen, Professor Jens Ulstrup, Ph.d.-studerende Christian Kallesøe, Adjunkt Kristian S. Thygesen og Ph.d.-studerende Joachim Fürst.