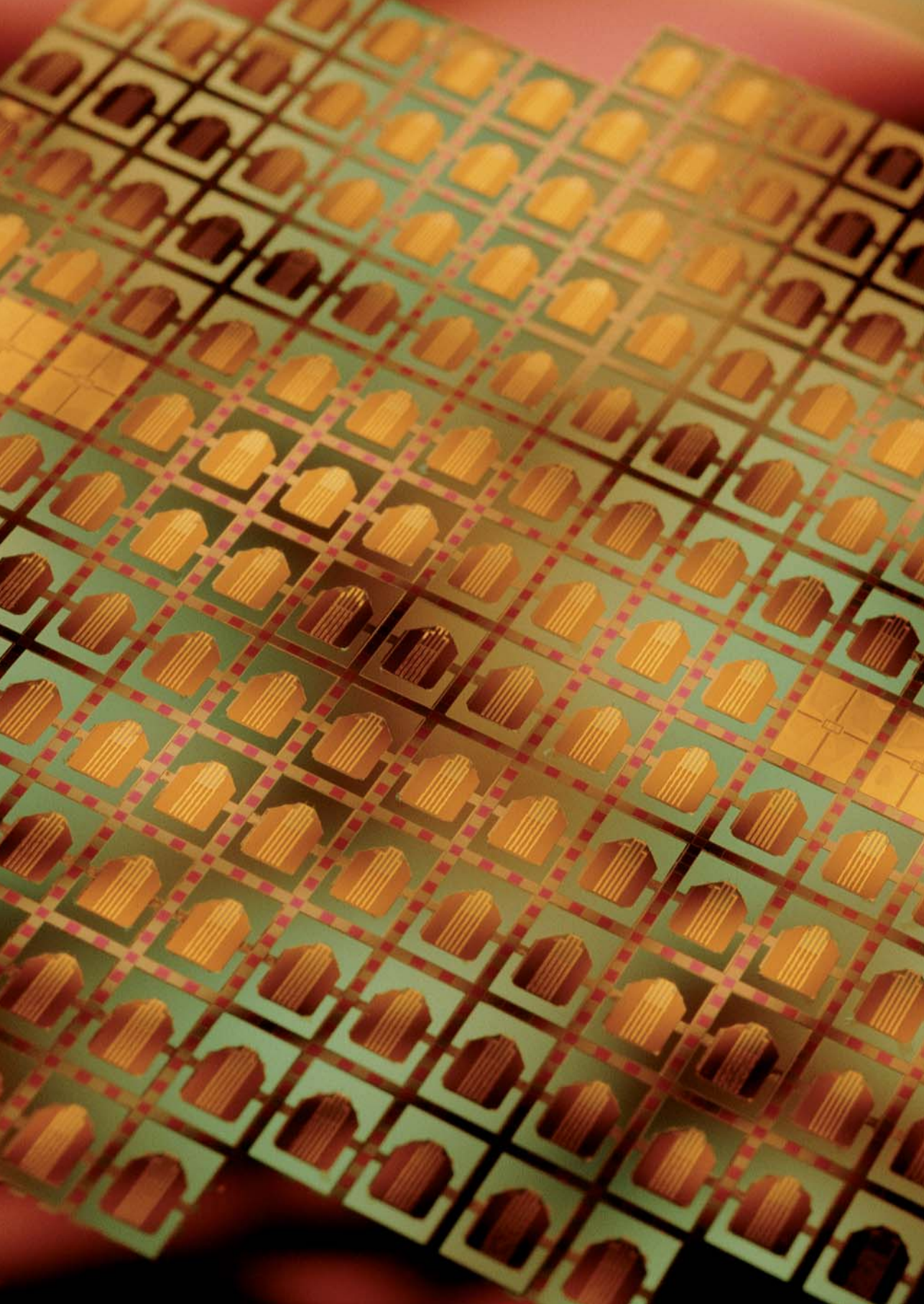




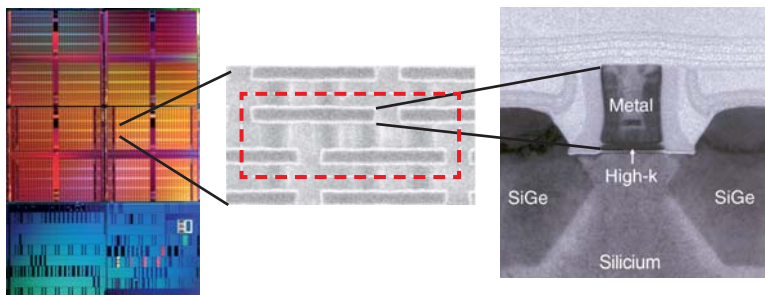
Nanofabrikationens værktøjskasse

Zachary Davis, Jan Hales, Dirch Hjorth Petersen, Rasmus Haugstrup Pedersen,
Institut for Mikro- og Nanoteknologi

De færreste ved det, men allerede i dag er vi omgivet af apparater, der indeholder nanofabrikerede dele. Både din mobiltelefon, den bærbare computer og sensoren, der udløser bilens airbag, indeholder dele, der er så små, at de kun kan fremstilles ved hjælp af nanofabrikation. Teknikkerne er avancerede kopier af trykkeriets og billedhuggerens gammeldags metoder, og i takt med at nanofabrikationens værktøjskasse bliver større og endnu mere avanceret, vil vi få langt flere apparater med indbygget nanoelektronik og -mekanik. Computerne bliver endnu mindre og nanosensorer vil kunne spore alt lige fra sprængstoffer til kræftceller og bakterier.

Nanofabrikation defineres som opbygningen af strukturer og materialer i nano- og mikrostørrelse. For eksempel fremstilles de mikrochips, der er inden i alle computere, mobiltelefoner og lommeregnerne, ved hjælp af nanofabrikation. På hver mikrochip sidder der millioner af *transistorer*, det vil sige bittesmå elektriske kontakter, der tilsammen danner elektrisk kredsløb, som styrer og udfører apparatets funktioner. For eksempel indeholder mikrochipfabrikanten Intels nyeste mikrochip en milliard transistorer. På en chip på størrelse med en fingernegl vel at mærke! Den slags pillearbejde kan kun lade sig gøre med nanofabrikation. I dette kapitel gennemgår vi de vigtigste teknikker bag nanofabrikation illustreret blandt andet ved fremstillingen af en nanobjælke, der bruges til at veje nanopartikler.

Figur 1. Intels nyeste 45 nm mikrochip (2008) (venstre) indeholder en milliard transistorer. Det stibede område på billedet i midten er $0,346 \mu\text{m}^2$ og indeholder seks transistorer (to vandrette og fire underliggende på tværs). Billedet yderst til højre viser en transistor set fra siden. Den mørke kasse ('Metal') er 45 nm bred.



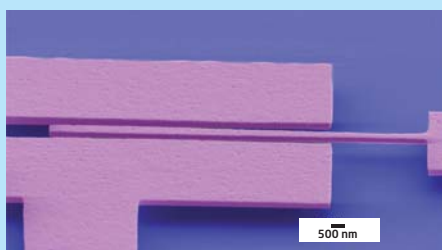
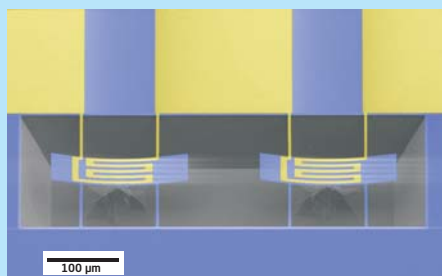
Nanofabrikationens vigtigste teknikker

Nanofabrikation er, i modsætning til hvad mange tror, ikke en helt ny teknologi, men derimod en videreudvikling af metoder, som allerede i dag bruges til fremstilling af mikroelektronik og MikroElektroMekaniske Systemer (MEMS) (boks 1). Mikroelektronik og MEMS-komponenter er blandt andet digitale mikrofoner i mobiltelefoner, miniature tryksensorer i vandpumper, accelerationssensorer i airbag, for blot at nævne nogle få. Ved at raffinere og presse værktøjerne bag de avancerede mikrosystemer til det yderste er forskerne nået frem til de eksklusive metoder, der i dag bruges til nanofabrikation.

Boks 1. MEMS

I MEMS kombineres mekaniske og elektroniske dele på samme siliciumchip ved hjælp af mikro- og nanofabrikation. MEMS kaldes somme tider for mikromaskiner og er normalt fra 1 μm (10^{-6} m) til 1 mm store. I bilens airbag sidder et MEMS i form af en mikrochip med en accelerationssensor. Hvis bilen på grund af et sammenstød brat stopper op, registrerer sensoren accelerationsændringen og sender et signal videre til den indbyggede elektronik, der udløser airbaggen.

MEMS-teknologien er udviklet på baggrund af teknikker fra computerindustrien. I modsætning til transistorer, der udelukkende sidder på overfladen af en siliciumskive, udnytter et MEMS skiven i hele dens tykkelse til at bygge mekaniske komponenter som membraner, frithængende bjælker og bevægelige mikrospejle.

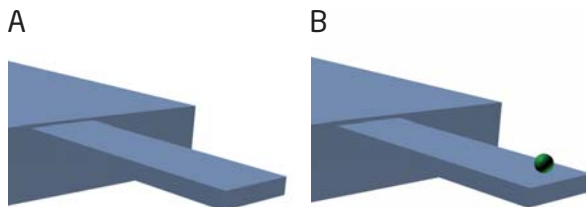


Figur 2. Eksempler på MEMS: Øverst ses to siliciumnitrid-bjælker (Si_3N_4), der kan spore biomolekyler. Billedet nedenunder viser en massesensor, mens billedet yderst til højre viser en tryksensor udviklet af Institut for Mikro- og Nanoteknologi på DTU i samarbejde med Grundfos.

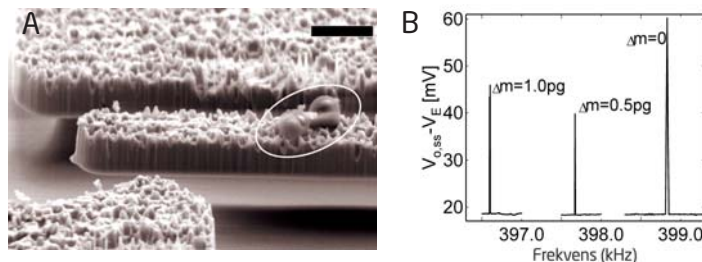
For rigtigt at forstå de fantastiske muligheder, men også problemerne ved nanofabrikation, skal vi træde nogle tusinde trin op af længdeskalaen fra nano- til mikrometerområdet og se nærmere på de tre fabrikationsteknikker, der er hjørnestenene i al nanofabrikation:

- Litografi
- Materialedeponering
- Ætsning

Teknikkerne beskrives gennem fremstillingen af en 200 nm bred nanobjælke af aluminium, der kan anvendes som en meget følsom massesensor. Ideen er at bringe bjælken i *resonans* (ligesom en stemmegaffel) ved hjælp af en elektrisk spænding, der sætter bjælken i svingninger. Resonansen opstår, når bjælken skubbes med en kraft, der svinger med samme frekvens som egenfrekvensen. Bjælkens *resonansfrekvens*, og dermed den kraft man skal påvirke bjælken med, er afhængig af dens masse og ændrer sig derfor, når en partikel sætter sig på bjælken (*figur 3*). Det vil sige, at man ved at måle ændringer i resonansfrekvensen kan bestemme massen af partiklen. I *figur 4* kan du se en skematisk fremstilling af princippet. I øjeblikket kan man måle ned til få hundreder molekyler men ved at skrumpe størrelsen af bjælken endnu mere, kan man måle mindre og mindre masse helt ned til enkelte molekyler. Det betyder, at metoden vil kunne bruges til at spore nanopartikler i luften på arbejdspladser, hvor de fremstiller nanomaterialer, eller til at finde kræftkuder, selv når der kun er ganske få celler til stede. Du kan læse mere om resonanssensorer og nanomekaniske sensorer i kapitel 7 om nanomekanik.



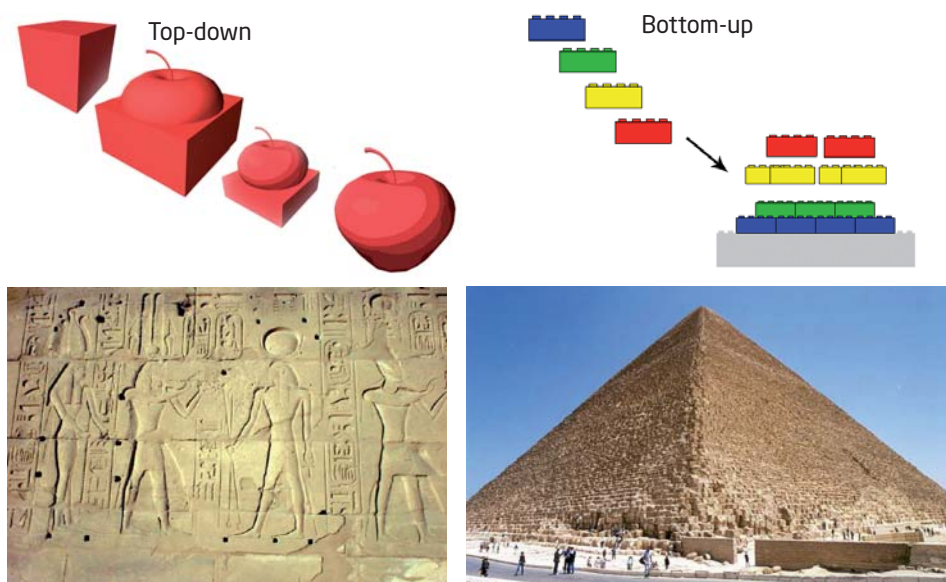
Figur 3. En massesensor med B. og uden A. partikel



Figur 4. Princippet i en bjælkebaseret massesensor. A. Billede af to polystyrenkugler på en aluminiums-bjælke taget med et Skanning Elektronmikroskop (SEM). B. Bjælkens svingningshastighed (frekvens) med henholdsvis to, en og ingen kugle ses på grafen (fra venstre mod højre). Fra ændringen i resonansfrekvensen kan partiklens masse m udregnes. pg betegner kuglernes vægt i picogram (10^{-12} gram).

Forskerne bygger med legoklodser

Enhver forsker inden for nanofabrikation arbejder med én af de to overordnede metoder, der på engelsk betegnes 'top-down' og den omvendte 'bottom-up' (figur 5). Ved 'top-down'-fabrikation starter man med materialer (som regel en siliciumskive), der har en størrelse på flere centimeter eller mere. Derfra arbejder man sig ned til nanometerdimensionen ved hjælp af de tre grundlæggende metoder: litografi, materialedeponering og ætsning. Det er 'top-down'-metoden, som vi benytter, når vi laver vores aluminiumsbjælke. Metoden kan sammenlignes med en stenhugger, der begynder med en 10 meter høj stensøjle og ender med en statue. Med sine forskellige værktøjer hugger han stadig mindre stykker sten af og ender med en statue med talrige motiver og bittesmå detaljer. Ved 'bottom-up' bygger man derimod materialet op fra bunden ved hjælp af nanobyggeklodser bestående af enkelte atomer eller molekyler. Du kan læse mere om 'bottom-up'-metoden i afsnittet om selvsamlende elektronik i kapitel 9. 'Top-down'-metoden er en videreudvikling af allerede kendte fremstillingsteknikker, hvorimod 'bottom-up'-metoden er den nyeste inden for nanofabrikation.



Figur 5. Nanofabrikation. Ved 'top-down' starter man oppefra og fjerner mere og mere af materialet. Størrelsen af detaljer og strukturer kan ikke blive mindre end de værktøjer, man laver strukturerne med. Hieroglyffer er hugget ind i stentavler med 'top-down'-metoden. Med 'bottom-up'-metoden bygger man sin struktur eller komponent op fra bunden med atomer eller molekyler som en avanceret legofigur. Pyramiderne er et eksempel på 'bottom-up'-metoden, omend på en noget større skala.

Litografi: Gammel vin på nye flasker

Den første nanofabrikationsmetode, vi tager i brug til fremstillingen af aluminiumsbjælken, er litografi. Litografi er egentlig en gammel teknik til overføring af tegninger

eller mønstre fra ét materiale til et andet. Metoden blev opfundet af den tyske trykker Alois Senefelder, som i 1798 for første gang trykte et mønster, han havde tegnet på en stenoverflade, på et papir. I den klassiske litografimetode ridser man sit mønster i stenen, som derefter behandles kemisk, således at kun mønstret er modtagelig for den farve, der efterfølgende smøres på stenen. Til sidst kan farven på mønstret i stenen overføres til papir (figur 6).

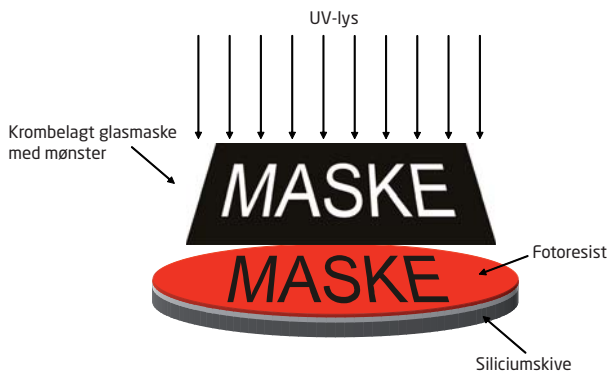
Figur 6. Illustration af klassisk litografi. Til venstre ses stenen med det indridsede mønster. Til højre papiret med det overførte mønster.



Inden for mikro- og nanofabrikation arbejdes der stadig med litografi, men her laver man sit mønster på en skive af silicium (Si), som desuden er endemålet, det vil sige man overfører ikke mønstret til et andet materiale, men arbejder videre på siliciumskiven. En anden forskel mellem klassisk litografi og moderne litografi er, at man i sidstnævnte bruger ultraviolet lys (UV-lys) i stedet for farve til at tegne med. Det kaldes for *fotolitografi* eller *UV-litografi*.

Første skridt i fotolitografi er at dække en skive af Si med et lysfølsomt materiale kaldet fotoresist. Fotoresisten, der har en konsistens som sirup, spredes ud over den hurtigt roterende siliciumskive til et 1 μm tyndt lag, hvorefter skiven tørres, så resisten bliver hård. Når man efterfølgende lyser på fotoresisten gennem en krombelagt glasplade, hvori der er tegnet et mønster, ændres de kemiske egenskaber af de områder af resisten, som ikke er beskyttet af kromoverfladen. Dermed kan de opløses i en basisk fremkaldervæske (NaOH) og vaskes af siliciumskiven (figur 7). Tilbage er den resterende resist med mønstret fra glaspladen tegnet ned i. Dette trin svarer til processen i den klassiske litografi, hvor kunstneren ridser sit mønster i stenoverfladen.

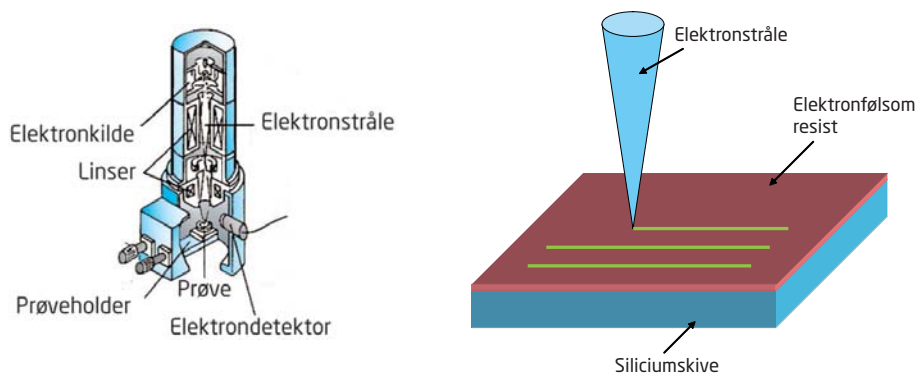
Figur 7. Princippet i fotolitografi. Fotoresisten (rød) belyses med UV-lys gennem en krombelagt glasmaske med mønster i. De områder af resisten, som ikke blev beskyttet af kromlaget, kan efterfølgende opløses i NaOH og vaskes af siliciumskiven.



Elektroner erstatter lys

Desværre har UV-litografi sine begrænsninger med hensyn til, hvor lille et mønster man kan fremstille. På samme måde som tegneren ikke kan tegne tyndere streger end tykkelsen af den tusch, han tegner med, kan forskeren heller ikke lave tyndere streger end diameteren af UV-lysstrålen. Med standardudstyret til forskningsformål kan man tegne linjer ned til en mikrometer brede. I industrien, hvor de har bedre udstyr, kan linjebredden reduceres til omkring et par hundrede nanometer. De meget dyre og avancerede industrielle teknikker bruges for eksempel i massefremstillingen af de mikrochips, der findes i alle computere. Til forskningsformål er teknikkerne normalt for kostbare at anvende, da målet ikke er masseproduktion, men snarere at fremstille få komponenter, der er både mindre end de nuværende og har helt nye funktioner som for eksempel massesensoren. Da vores aluminiumsbjælke kun skal være 250 nm bred, må vi altså benytte os af en anden metode end fotolitografi.

For at finde en vej uden om lysets begrænsninger har forskere udviklet en litografisk teknik, hvor man bruger elektromagnetisk stråling, som har en endnu kortere bølgelængde end lys. Som beskrevet i kapitel 2 under *elektronmikroskoperne* kan man fotografere objekter på nanometerskala med en elektronstråle (*Skanning Elektron- og Transmissions Elektronmikroskoper*). Ligesom elektroner kan erstatte lys til at tage billeder med, kan de også erstatte lyset i litografi. I *elektronstrålelitografi* bruger man elektroner til at tegne et mønster på elektronfølsom resist oven på siliciumskiven (figur 8). Metoden er langt mere præcis end UV-litografi, men også meget langsommere, fordi man ikke bruger nogen maske, men tegner strukturerne streg for streg. Elektronstrålelitografianlægget ligner et standard Skanning Elektronmikroskop (SEM). Den vigtigste forskel er, at man kan styre elektronstrålen meget mere præcist i litografisystemet. I et SEM skanner man strålen frem og tilbage over en prøve for at fotografere prøven. I et elektronstrålelitografisystem er der brug for at kontrollere strålens bevægelse og samtidigt at tænde og slukke for strålen, så man kan tegne et mønster på en overflade.



Figur 8. Schematisk fremstilling af elektronmikroskopet og elektronstrålelitografi.



Figur 9. Renrumslaboratoriet DANCHIP på Danmarks Tekniske Universitet huser avanceret udstyr til mikro- og nanofabrikation, herunder et højt avanceret elektronstrålelitografianlæg.

Da elektroner både har højere energi og kortere bølgelængde (cirka 1 nm) end fotoner, er den teoretiske grænse for at fokusere en elektronstråle meget mindre end lys. De bedste elektronstråleanlæg kan tegne mønstre med detaljer helt ned til 10 nm. Det betyder, at vi med elektronstrålelitografi snildt kan tegne vores 250 nm brede aluminiumsbjælke (figur 10).



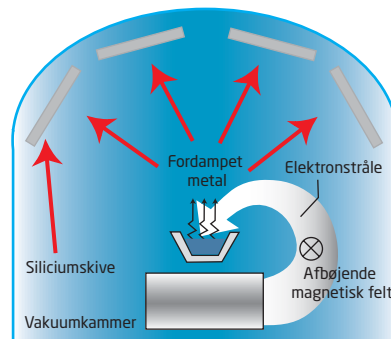
Figur 10. A. Siliciumskive uden, B. med resist og C. siliciumskive med resterende resist. Med en elektronstråle har vi tegnet vores mønster, hvorefter resisten i det pågældende område er blevet opløst og vasket af.

Materialeredeponering

Næste skridt i fremstillingen af aluminiumsbjælken er deponering af aluminium på siliciumskiven. Metoden kaldes for materialeredeponering, fordi man lægger (nanometer tynde) lag af et materiale på overfladen af eksempelvis Si. Teknikken kaldes også for tyndfilmsdeponering og bruges blandt andet til at lave computerchips og solceller.

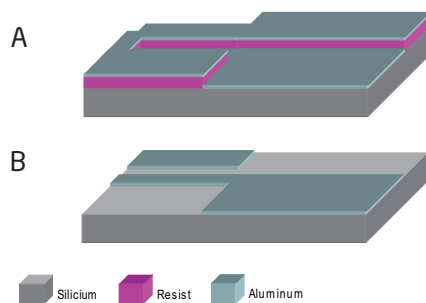
Til deponering af rene metaller bruges en teknik kaldet fysisk dampdeponering. En klump af super rent metal varmes op ved lavt tryk, til metallet fordampes. Når de varme metalatomer fra dampen rammer den kolde siliciumskive, kondenserer metallet som rim på en bilrude (figur 11).

Figur 11. Materialeredeponering. Metallet fordampes i vakuum. Når det rammer siliciumskiven, kondenserer det og lægger sig som et tyndt lag på overfladen.



Metoden bruges også i fremstillingen af vores aluminiumsbjælke, hvor vi nu skal lægge aluminium på siliciumskiven. Aluminium varmes op, til det fordamper, og dampen lægger sig efterfølgende som en tynd film oven på siliciumskiven. Ved at styre hvor længe skiven udsættes for aluminiumsdampen, kan vi kontrollere tykkelsen af filmen helt ned til en filmtykkelse på blot få nanometer. Vores aluminiumsbjælke skal dog være 100 nm tyk. Aluminium lægger sig henover både de områder, hvor elektronstrålen har skrevet, og områderne med resisten. Vi er kun interesseret i at have aluminium liggende på områderne defineret af elektronstrålen. Fidusen ved at lægge metallet oven på både resist og Si er, at vi bagefter kan fjerne det overflødige aluminium ved at opløse den underliggende resist med et opløsningsmiddel. Kun det aluminium, der ligger direkte på Si, bliver siddende tilbage. Denne metode kaldes for 'lift-off'. Nu har vi en skive af Si med en bjælke af aluminium oven på (figur 12).

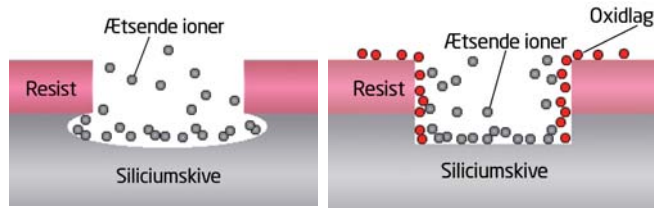
Figur 12. Materialedeponering og 'lift-off'. I A. lægges en tynd film af aluminium ud over både silicium og resist, hvorefter B. metallet fjernes igen fra de områder, hvor der er resist under ved at opløse denne. Det kaldes for 'lift-off'.



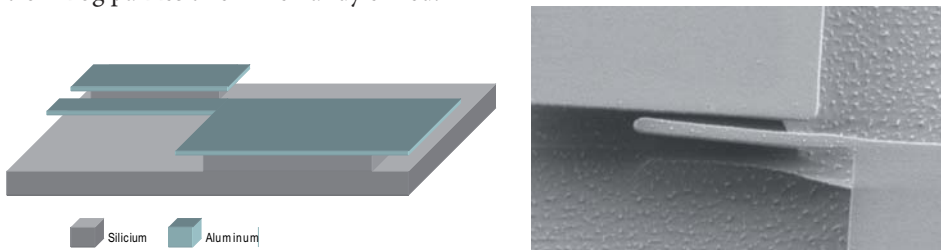
Ætsning

I det sidste trin i fremstillingen af vores aluminiumsbjælke skal bjælken frigøres fra det underliggende siliciumlag. Dette gør vi ved at fjerne Si uden at ætse metallet. Der findes to forskellige måder at ætse på, henholdsvis våd- og tørætsning. Til en vådætsning bruger man et kemikalie i flydende form. På grund af den krystallinske struktur af silicium kan visse kemikalier selektivt ætse i bestemte krystalretninger (for eksempel kaliumhydroxid, KOH). Denne specielle egenskab tillader blandt andet avancerede design af mikrochips. Her er det imidlertid ikke muligt kun at ætse Si uden også at ætse aluminium. I stedet er vi nødt til at bruge tørætsning, hvor kemikaliet er i plasmaform. *Plasma* er en gas af ioner, frie elektroner og *frie radikaler*, det vil sige meget reaktive atomer og molekyler. De frie radikaler bombarderer overfladen og ætser Si væk. Ætsning kan foregå enten *isotropisk*, det vil sige ætsning med samme hastighed i alle retninger ('*isos*' = ens, '*tropos*' = retning) eller *anisotropisk* ('*aniso*' = ikke ens), ætsning med forskellig hastighed i forskellige retninger (figur 13). Sammensætningen af gassen bestemmer ætsningstypen. I vores tilfælde, hvor vi skal lave en frithængende bjælke, bruger vi isotropisk ætsning med en gas af svovlhexafluorid (SF_6) for at ætse siliciumlaget under bjælken væk. Ved anisotropisk ætsning bruger man oxygen sammen med SF_6 -gassen. Oxygen danner et beskyttende oxidlag på substratets sider, som kun kan ætzes væk igen på de sider, der rammes direkte af de ætsende ioner. De spidse nåle til *Atomic Force Mikroskopet* (AFM), som du kan læse om i kapitel 2, fremstilles ved hjælp af anisotropisk ætsning.

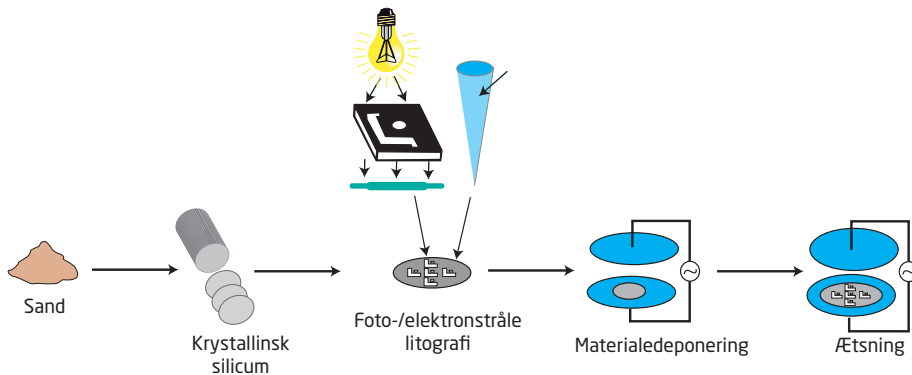
Figur 13. Tørætsning med en gas af SF_6 . Til venstre ses, hvordan frie radikaler ætser siliciumoverfladen væk ved isotropisk ætsning. Til højre ses et eksempel på anisotropisk ætsning, hvor et oxidlag beskytter de sider, der ikke rammes direkte af de frie radikaler.



Vi har nu fremstillet en frithængende aluminiumsbjælke ved hjælp af først elektronstrålelitografi, dernæst materialedeponering og til sidst isotropisk tørætsning (figur 14). Du kan se en skematisk gennemgang af hele processen i figur 15. For at nanobjælken kan fungere som en massesensor, skal den selvfølgelig bygges sammen med avanceret elektronik og pakkes til en lille handy enhed.



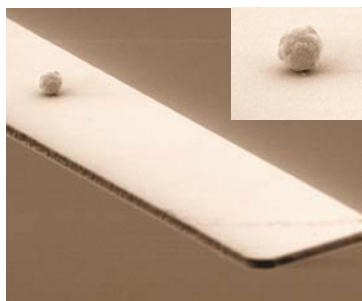
Figur 14. Skematisk fremstilling af aluminiumsbjælken (venstre) og et SEM-billede af aluminiumsbjælken (højre). Bjælken er 4 μm lang, 300 nm bred og 100 nm tyk.



Figur 15. Nano- og mikrofabrikation. Fremstilling af mikro- og nanokomponenter sker ved hjælp af tre centrale teknikker: Litografi, materialedeponering og ætsning. Fra venstre mod højre: Siliciumskiver fremstilles af sand (siliciumdioxid), der smeltes til krystallinsk Si og skæres i skiver. Efter at siliciumskiven er blevet overtrukket med resist, laves et mønster i resisten med enten UV- eller elektronstrålelitografi, hvorefter resisten fremkaldes. Så følger materialedeponering af aluminium til selve bjælken. Resisten og det aluminium, der ligger oven på resisten, fjernes ved 'lift-off', hvor resisten opløses (ikke vist). Sidste skridt er at frigøre den tilbageværende aluminiumsbjælke ved at ætse en del af den underliggende silicium væk uden at ætse metallet. Det gøres ved isotropisk tørætsning.

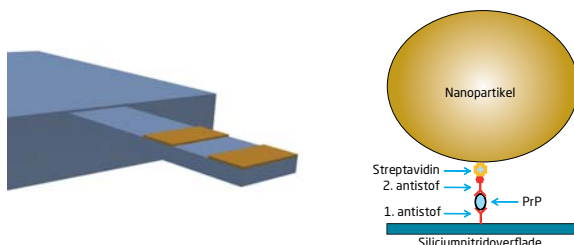
Kunstige næser

Som nævnt kan massesensoren bruges til at bestemme massen af partikler. Efterhånden som produktionen af nanomaterialer stiger og ændrer sig fra at være fremstilling af små mængder i forskningslaboratorier til masseproduktion på fabrikker, bliver det også meget vigtigt at holde øje med, om der slipper partikler ud i luften på fabrikken. Fordi nanopartikler er så små, kan man ikke bruge eksisterende måleapparater, og derfor er nano-massesensoren en meget vigtig opfindelse. Sensoren kan både sladre om, at der er partikler til stede, og hvor store de er (figur 16).



Figur 16. SEM-billede af en guldpartikel på en bjælke. Det indsatte billede viser guldpartiklen tæt på. Sensoren afslører både partiklens tilstedeværelse og størrelsen af dens masse.

Faktisk er sensoren så præcis, at man ud fra ændringen i resonansfrekvensen også får at vide, hvor på bjælken partiklen befinder sig. Det betyder, at man ved at designe bjælken, så forskellige molekyler binder sig til forskellige områder på den, skaber en slags kunstig næse, der skelner mellem forskellige partikler, eksempelvis duftstoffer, gasser, sprængstoffer eller biologiske molekyler, efter hvor de ligger på bjælken (figur 17). Man kan også forstærke ændringen i resonansfrekvensen, så den bliver mere følsom. På billedet til højre i figur 17 bliver en forholdsmæssigt stor nanopartikel brugt til at forstærke signalet fra et protein bundet til en massesensor. Markøren (1. antistof) på bjælken binder et prionprotein (PrP), som findes hos køer smittet med kogalskab (BSE) og mennesker med Creutzfeldt Jakobs sygdom. Efterfølgende binder endnu et antistof (2. antistof), som har en nanopartikel i den modsatte ende, sig til proteinet. Vægten af det bundne kompleks er meget større end PrP-proteinet alene, og dermed forstærkes signalet så meget, at bjælken kan bruges til at spore proteinet i meget små mængder (2 ng/ml), det vil sige, allerede før det smittede dyr eller menneske får synlige symptomer på sygdommen.



Figur 17. En 'nanonæse' med forskellige markører (venstre) på forskellige områder af bjælken kan eksempelvis bruges til at skelne mellem forskellige DNA-sekvenser eller proteiner. Ændringen i resonansfrekvensen kan forstærkes ved at binde en forholdsmæssigt stor nanopartikel til proteinet (højre). Derved forstærkes signalet så meget, at bjælken kan bruges til at spore meget små mængder protein.

Computere er lavet af sand

I de foregående afsnit har vi gennemgået de tre grundlæggende teknikker bag mikro- og nanofabrikation. De følgende afsnit handler om computerens opbygning, og hvordan nanofabrikationens teknikker anvendes i fremstillingen af mikrochips.

Silicium er helt essentielt i fremstillingen af en lang række mikro- og nanokomponenter. For eksempel er stort set alle computerchips lavet af Si. Det skyldes, at Si er en såkaldt *halvleder*, et materiale, som både kan lede strøm, men også fungere som en *isolator*, det vil sige blokere strømmen. På grund af stoffets halvlederegenskaber er det muligt at lave gode transistorer af Si, de millioner af bittesmå kontakter, der tænder og slukker for strømmen i computerens processor. Desuden består 25 % af jordskorpen af Si, oftest i form af sand (siliciumdioxid, SiO_2), og materialet er derfor nemt tilgængeligt (figur 18).



Figur 18. Silicium: fra sand til skive. Sand (SiO_2) (venstre) smeltes og bearbejdes til lange krystaller, der efterfølgende skæres i tynde skiver på ca. 0,2-0,3 millimeter (højre).

Computerens hjerne

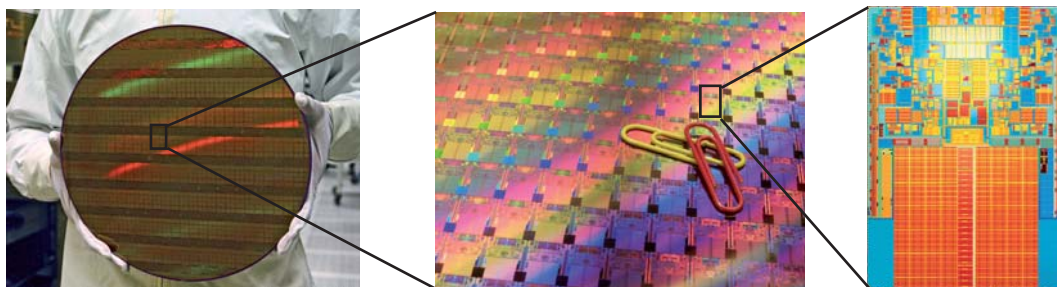
De vigtigste dele af en computer er dem, du ikke kan se, nemlig harddisken og processoren. Harddisken er computerens permanente hukommelse, mens processoren er arbejdshesten, der udfører alle de tunge beregninger. Processoren er den, som vi i starten af kapitlet også kaldte for en mikrochip. Som du måske kan huske, er chippen ikke større end en fingernegl, og alligevel kan den rumme op til en milliard transistorer. Det enorme antal transistorer er forklaringen på, at computere i dag er så lynhurtige. Tilsammen kan kontakterne lave millioner af beregninger i sekundet. Den fantastiske udvikling, som computere har gennemgået fra de kæmpestore datamater, der fyldte hele stuer i 1950'erne til de i sammenligning bittesmå bærbare, mange af os slæber rundt på i dag (figur 19), har kun kunnet lade sig gøre takket være teknikkerne bag nanofabrikation. Desværre er vi ved at nærme os grænsen for, hvor mange flere transistorer vi kan pakke sammen på en mikro-

chip med de eksisterende teknikker. Du kan læse mere om dette problem og nogle af de løsninger, som forskerne arbejder på, i kapitel 10 om nanoelektronik. Her skal vi kort se på, hvordan de store chipproducenter som Intel og IBM masseproducerer mikrochips.

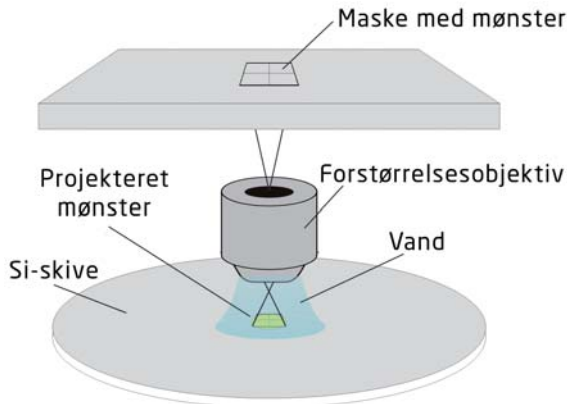


Figur 19. Venstre: Danmarks første computer DASK fra 1958 fyldte en hel spisestue i en villa i Valby. Højre: I dag vejer de mindste bærbare ikke mere end et par kilo og kan tages med alle vegne.

Der er to krav til en hvilken som helst litografimetode, der skal bruges til kommerciel fremstilling af mikrochips. Den skal være hurtig, og den skal være billig. Ved at bruge nogle af de korteste ultraviolette bølgelængder, såkaldt *dyb ultraviolet stråling* (DUV) på 193 nm, til UV-litografi er det muligt at fremstille de tætpakkede chips. Men for at mikrochip-pene og dermed computerne bliver til at betale for almindelige mennesker, skal metoden også være billig, og det kræver blandt andet massefremstilling. Mikrochips fremstilles i tusindevis af gangen på 20-30 cm store siliciumskiver, såkaldte 'wafers', og skæres efterfølgende ud i enkelte mikrochips med en diamantsav (figur 20). Men selvom man altså kan producere mikrochips i hobevis, er teknikken stadig utroligt krævende og derfor også meget dyr. For eksempel bliver dybt ultraviolet lys absorberet af luft, og det kræver derfor en helt særlig teknik at lave DUV-litografi. Metoden kaldes for '*immersionslitografi*', hvor lyset først bevæger sig i vakuum ned gennem et system af linser og til sidst gennem ultra-rent vand, før det rammer fotoresisten (figur 21).



Figur 20. Mikrochips masseproduceres med DUV-litografi på store siliciumskiver, hvorfra de bittesmå mikrochips skæres ud. Derfor er teknikken langt billigere og hurtigere end elektronstrålelitografi. Fra venstre mod højre: Silicium wafer med tusindvis af mikrochips, udsnit af wafer og en enkelt mikrochip.

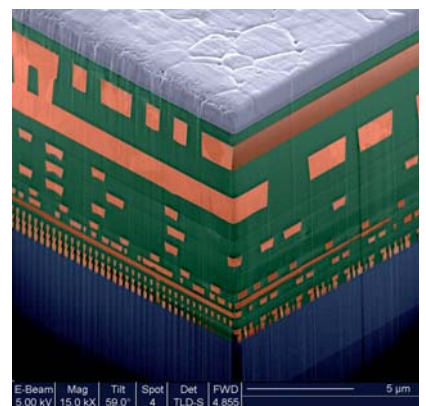


Figur 21. DUV-litografi. UV-lys med bølglængder under 300 nm absorberes af luft, og det kræver derfor helt særligt udstyr at lave DUV-litografi. Lyset passerer først i vakuum gennem en serie af linser, der styrer og samler lysstrålen. Strækningen mellem den sidste linse og waferen er dækket med vand, som UV-lyset bevæger sig igennem, før det rammer resisten.

Ingeniørkunst

Det var teknikken bag fremstillingen. Selve fremstillingsprocessen er også lidt af et stykke ingeniørkunst. En mikrochip består af 12-15 lag med transistorer, ledninger og isoleringer (figur 22). Lagene fremstilles et ad gangen ved de tre trin, vi gennemgik tidligere: DUV-litografi, materialedeponering og ætsning. Herefter stables de med submikrometer nøjagtighed. Det er altafgørende, at komponenterne i de forskellige lag forbindes præcist, og denne proces, som kaldes for 'alignment' (opstilling på linje), er i sig selv særdeles vanskelig.

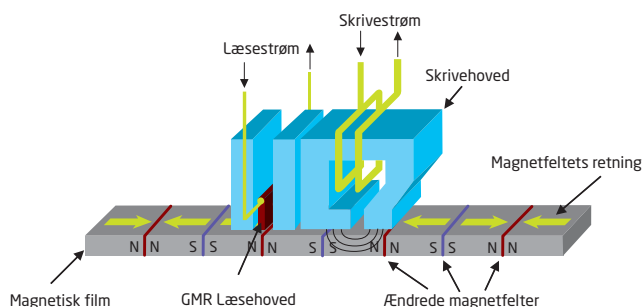
Trods alle vanskelighederne ved mikrochipproduktionen er det altså lykket at udvikle en metode til massefremstilling, der indtil i dag har gjort det muligt at pakke stadig flere transistorer på en mikrochip, *samtidig med* at prisen per chip er gået ned. Inden alt for mange år vil den udvikling efter alt at dømme gå i stå, og nye metoder må tages i brug for at fremstille mindre strukturer. Sådan en metoden findes allerede. Som beskrevet tidligere kan man ved hjælp af elektronstrålelitografi 'tegne' strukturer ned til 10 nm. Desværre beskriver ordet 'tegne' ret præcist metoden. I modsætning til UV-litografi, hvor man kan belyse et område svarende til en hel mikrochip på en gang, skal hver eneste linje og struktur tegnes en nanometer ad gangen med elektronstrålelitografi. Det giver en fantastisk nøjagtighed, men også en utrolig langsom fremstillingsproces, der slet ikke er anvendelig til massefabrikation. Forløbig forsøger mikrochipproducenterne at løse problemet ved at presse fotolitografien til sit yderste. For eksempel forsøger de at erstatte DUV med *ekstremt ultraviolet lys* (EUV), hvor bølglængden af lyset er helt nede på 13 nm. Andre har luftet tanken om at bruge røntgenstråling, som har en endnu kortere bølglængde på blot 0,005-10 nm.



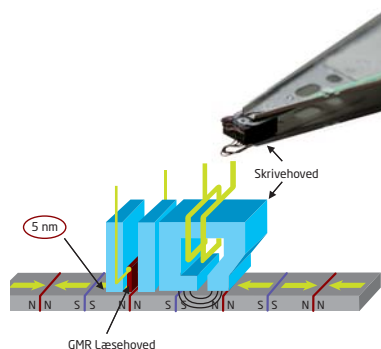
Figur 22. Tværsnit af mikrochip fra IBM med 11 lag af transistorer, ledninger og isolering.

Harddisken - computerens pladespiller

Harddisken er computerens permanente hukommelse. Her ligger alle dine programmer, dokumenter, ferie billeder og musik gemt. Harddisken består af flere forskellige mekaniske dele, hvoraf dataskiverne og læse-/skrivehovedet er det mest interessante ud fra et nanoteknologisk synspunkt. Lidt forsimplet kan man sige, at en harddisk er en kombination af en gammeldags båndoptager (dataskiverne) og en gammeldags pladespillers pickup (læse-/skrivehovedet). Dataskiverne er der, hvor informationen gemmes i form af bitte-små magnetiske områder, ligesom på båndet i båndoptageren. De magnetiske områder er blot få hundrede nm² og kan antage de binære talværdier '1' eller '0'. '1' svarer til det område, hvor to magneter med ens poler støder op mod hinanden (S-S eller N-N), mens '0' svarer til overgangen mellem to modsatrettede magnetiske poler. Læse-/skrivehovedet, der minder om en pickup, læser enten retningen af de magnetiske områder (læsehovedet), som kaldes for *bits*, eller det vender retningen af bitsene fra '0' til '1', når den skriver data på dataskiven (skrivehovedet) (figur 23). Det fysiske fænomen, der gør det muligt at aflæse disse nanosmå områder kaldes for 'Giant Magneto Resistance' forkortet GMR. GMR er en kvantemekanisk effekt, som vi ikke vil komme nærmere ind på her, ud over at læsehovedet består af en sådan GMR sensor, men du kan læse mere om GMR i kapitel 10 om nanoelektronik.



Figur 23. Dataskiverne i en harddisk består af små magnetiske områder. To tilstødende ens magnetiske poler (N-N eller S-S) repræsenterer det binære tal '1', mens modsatrettede tilstødende poler (N-S, S-N) svarer til '0'. Læse-/skrivehovedet bevæger sig hen over harddiskens overflade, mens det enten aflæser eller ændrer magnetiseringen af de bitte-små områder på overfladen.



Figur 24. Læse-/skrivehovedet (venstre) bevæger sig med mere end 300 km/t og en afstand på 5 nm henover harddiskens overflade, mens det enten aflæser eller ændrer magnetiseringen af de bittesmå områder på overfladen. Det svarer til, at en 74 meter lang jumbojet flyver i en højde på kun 0,7 mm over jorden.



I dag er det normalt med flere hundrede gigabits (*giga* = 1 milliard bits) på en harddisk. Det er derfor indlysende, at disse magnetiske bits ikke må optage særlig meget fysisk plads, før selve harddisken fylder for meget til at kunne anvendes i praksis. For at læse eller skrive information i disse områder er det nødvendigt, at læse-/skrivehovedet er af samme størrelsesorden, som de magnetiske områder, da hovedet ellers ikke kan skelne de enkelte områder fra hinanden. Mens dataskiven roterer, flyver læse-/skrivehovedet hen over selve disken med en hastighed på mere end 300 km/t med en højde på kun 5 nm (*figur 24*)!

Den nanoteknologiske værktøjskasse

Dette kapitel har givet en oversigt over nanofabrikation, der dækker over en række meget forskellige teknikker – lige fra klassisk litografi, hvor principperne har været kendt i flere hundrede år, til moderne ætsning og materialedponering. Som vi har vist, bruges metoderne blandt andet til at fremstille mikrochips til computere og anden elektronik. Takket være utroligt dygtige ingeniører, som hele tiden har forbedret og presset teknikker til deres yderste, er det i dag muligt at fremstille og pakke millionvis af bittesmå transistorer på en fingernegl stor mikrochip. I takt med at nanofabrikation tages i brug inden for flere grene af videnskaben, som eksempelvis mekanik, kemisk analyse, optik og biologi, vil vi få endnu flere nanomekaniske og -elektroniske apparater og komponenter, for eksempel sensorer, der sporer biologiske molekyler som massesensoren, der er blevet beskrevet i dette kapitel. Nanofabrikation er værktøjskassen, der gør det muligt for andre forskere at foretage nye og spændende opdagelser.



Kapitlets forfattere. Fra venstre med uret: Ph.d.-studerende Jan Hales, Ph.d.-studerende Dirch Hjorth Petersen, Lektor Zachary Davis og Ph.d.-studerende Rasmus Haugstrup Pedersen.