

FFI RAPPORT

NANOTEKNOLOGI - En innføring

VAN RHEENEN Arthur D.

FFI/RAPPORT-2005/02017

NANOTEKNOLOGI - En innføring

VAN RHEENEN Arthur D.

FFI/RAPPORT-2005/02017

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2005/02017 1a) PROJECT REFERENCE FFI-I/1014	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 27		
4) TITLE NANOTEKNOLOGI - En innføring NANOTECHNOLOGY - An introduction				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) VAN RHEENEN Arthur D.				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> a) <u>Nanotechnology</u> b) <u>Information technology</u> c) _____ d) _____ e) _____ </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>Nanoteknologi</u> b) <u>Informasjonsteknologi</u> c) _____ d) _____ e) _____ </td> </tr> </table>			a) <u>Nanotechnology</u> b) <u>Information technology</u> c) _____ d) _____ e) _____	IN NORWEGIAN: a) <u>Nanoteknologi</u> b) <u>Informasjonsteknologi</u> c) _____ d) _____ e) _____
a) <u>Nanotechnology</u> b) <u>Information technology</u> c) _____ d) _____ e) _____	IN NORWEGIAN: a) <u>Nanoteknologi</u> b) <u>Informasjonsteknologi</u> c) _____ d) _____ e) _____			
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT This report provides an introduction to many aspects that are associated with nanotechnology. Generally, it is expected that nanotechnology will find its way into many products, both on the civilian and the military market. In addition to describing the many aspects some thought is given to the ramifications, in terms of best-case and worst-case, scenarios.				
9) DATE 2005-07-04	AUTHORIZED BY This page only Jan Erik Torp	POSITION Director		

ISBN 82-464-0961-1

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	TOP-DOWN-TILNÆRMING TIL NANOTEKNOLOGI	7
3	BOTTOM-UP-TILNÆRMING	11
4	BEDØMMELSE AV NANOTEKNOLOGI	21
5	DEN GLOBALE INNSATSEN	22
6	MILITÆR NANOTEKNOLOGI	23
7	OPPSUMMERING	24
	Litteratur	27

NANOTEKNOLOGI - En innføring

1 INNLEDNING

I denne rapporten presenteres en innføring i mange aspekter som assosieres med nanoteknologi. Nanoteknologidomenet defineres ofte å strekke seg fra 0,1 – 100 nanometer (nm), hvor en nanometer er det samme som en milliondels millimeter. Dette er også størrelser som man finner på atomnivå – for eksempel er en typisk atomavstand i krystaller 0,3 nm.

Forventningene til nanoteknologien er store. Anvendelser har allerede funnet veien til markedet, men disse anses å være bare begynnelsen. Det som er nytt med nanoteknologi er at det er en felles plattform for fysikere, kjemikere og biologer. Utviklingen av instrumenter som for eksempel ”scanning probe microscopes”, har vært sentralt for stimuleringen av nanoteknologien. Med disse instrumentene er man i stand til se på enkeltatomer og skyve dem rundt på overflater.

Egenskapene til de små partikler (nanopartikler) som lages med denne teknologien er forskjellige fra bulkeegenskapene til stoffene de tilhører. Deres overflateareal er relativt større, noe som kan gjøre dem mye mer reaktive. I tillegg bestemmes egenskapene på denne størrelsesskalaen av kvantemekaniske effekter, som får fram andre egenskaper enn den ”klassiske” fysikken som beskriver større objekter.

Denne rapporten skrives som input til BAS5-prosjektet, som studerer sårbarheter i kritisk informasjonsinfrastruktur. I dette prosjektet er det viktig å ha øynene oppe for den teknologiutvikling verden vil oppleve i årene som kommer. Denne rapporten blir et viktig innspill til prosjektet i så måte, blant annet fordi nanoteknologi blir sentralt for utviklingen av IKT-kapasitet i årene som kommer.

Rapporten er basert på to foredrag: Ett for BAS5-prosjektet 2. mars 2005 og ett for Nasjonal sikkerhetsmyndighet 13. april 2005. Meningen med foredragene var å gi miljøene en introduksjon til nanoteknologi og vise til anvendelser av den nye teknologien. Dette er også formålet med denne rapporten.

2 TOP-DOWN-TILNÆRMING TIL NANOTEKNOLOGI

Den enorme utviklingen som vi har sett i halvlederindustrien de siste 30 årene, med en fordobling av regnekapasiteten til mikroprosessorene hver 18. til 24. måned, ser ut til å nå en grense rundt år 2015 – 2018. Dette kan innebære slutten på eventyret. Nå har det vært sagt flere ganger at man skulle nå en veisperring, men hittil har industrien klart å finne en vei rundt

problemene. Denne gangen ser det ut til å være mer alvorlig.

For å opprettholde utviklingen ("economies of scale"), må størrelsen på den enkle transistoren i prosessoren reduseres (top-down) og det må pakkes flere transistorer på en chip, se Tabell 2.1 – 2.2.

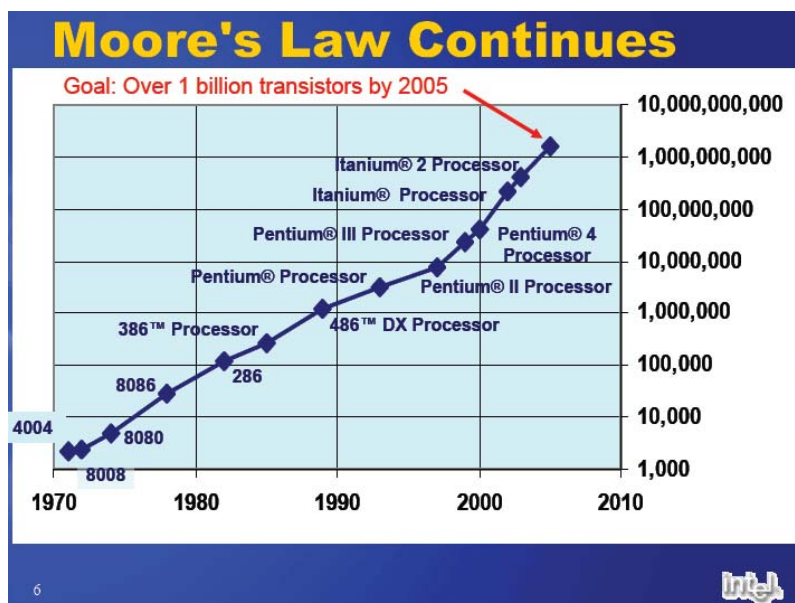
Year of production	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Technology node		hp90			hp65		
Printed gate length (nm)	65	53	45	40	35	32	28
Transistor density logic (Mtransistors/cm ²)	61	77	97	122	154	194	245

Tabell 2.1: Tall som viser den planlagte utviklingen i halvlederindustrien (1) – de nærmeste år.

Year of production	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Technology node	hp45			hp32			hp22		
Printed gate length (nm)	25	22	20	18	16	14	13	11	10
Transistor density logic (Mtransistors/cm ²)	309	389	490	617	778	980	1235	1555	1960

Tabell 2.2: Tall som viser den planlagte utviklingen i halvlederindustrien (1) – langtidsperspektiv.

Tabellene viser den planlagte utviklingen av halvlederteknologien. Gatelengden ("gate length") er et mål for transistorenes størrelse i nanometer, mens transistortettheten ("transistor density") forteller hvor mange millioner transistorer pakkes sammen på et område som er 1 cm² stort.



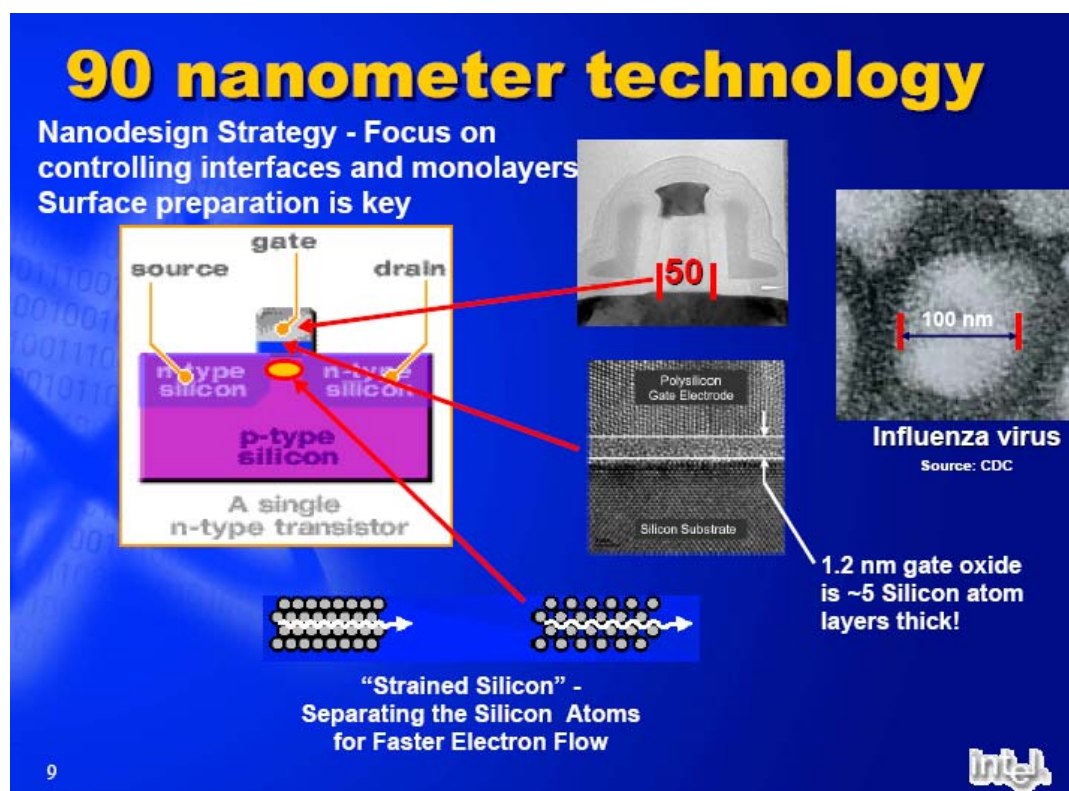
Figur 2.1. Antall transistorer per prosessorchip versus årstall. Chipens areal er nærmest konstant, slik at transistortettheten har økt kraftig.

I Figur 2.1 vises det hvordan transistortettheten har utviklet seg de siste 35 åra. I følge

halvlederindustriens planer skal den utviklingen fortsette slik, i hvert fall til år 2018. Hvis vi ser på gatelengden, har den gradvise utviklingen allerede beveget teknologien inn i nanoteknologidomenet (0,1-100 nm).

Enda tydeligere blir dette når man ser på en annen transistorstørrelse, nemlig gatedielektrikumet. For transistorer av type "technology node hp90" er gatedielektrikumet bare 1,2 nm tykt, og ligger dermed i den nedre del av nanoteknologidomenet. En typisk atomavstand i krystaller er 0,3 nm, og avhengig av hvordan atomene stables i krystallen utgjør 1,2 nm bare 5 – 6 atomlag.

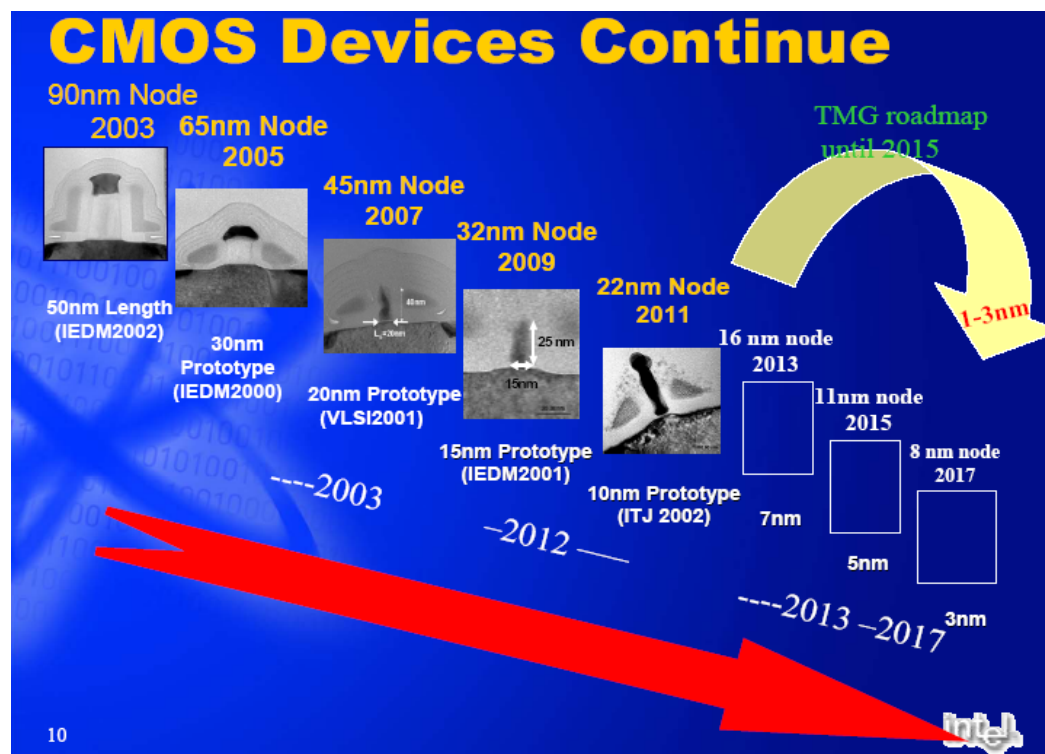
Figur 2.2 viser noen av disse detaljene. Egenskapene til et slikt tynt lag kan være vidt forskjellige fra egenskapene til tykkere lag av samme materialet. På denne lengdeskalaen er egenskapene bestemt av kvantemekaniske effekter, i motsetning til de "klassiske" fysikkreglene som gjelder for større systemer. I tillegg til størrelseskravet, oppfyller (i hvert fall deler av) halvlederteknologien også et annet viktig krav for å kunne betegnes som nanoteknologi – utnyttelse og design av nye materialeegenskaper. Før i tida fulgte dielektrikumets tykkelse den samme nedskaleringsregelen som gatelengden. Etter hvert som grensen på dielektrikumets tykkelse er nådd, må det tas i bruk andre materialer.



Figur 2.2. Dagens prosessorteknologi bruker transistorer med dimensjoner som er skissert her. Gatelengden er 50 nm og dielektrikumets tykkelsen er 1,2 nm.

Det er klart fra beskrivelsen ovenfor at utfordringene for materialvitenskapen er store, og det er sannsynlig at halvlederteknologien møter en eller annen vegg om ca ti år. Siden det er flere år mellom tidspunktet den første demonstratoren av en ny "technology node" vises fram og tidspunktet den tilhørende teknologien produserer komponenter for massemarkedet (se Figur

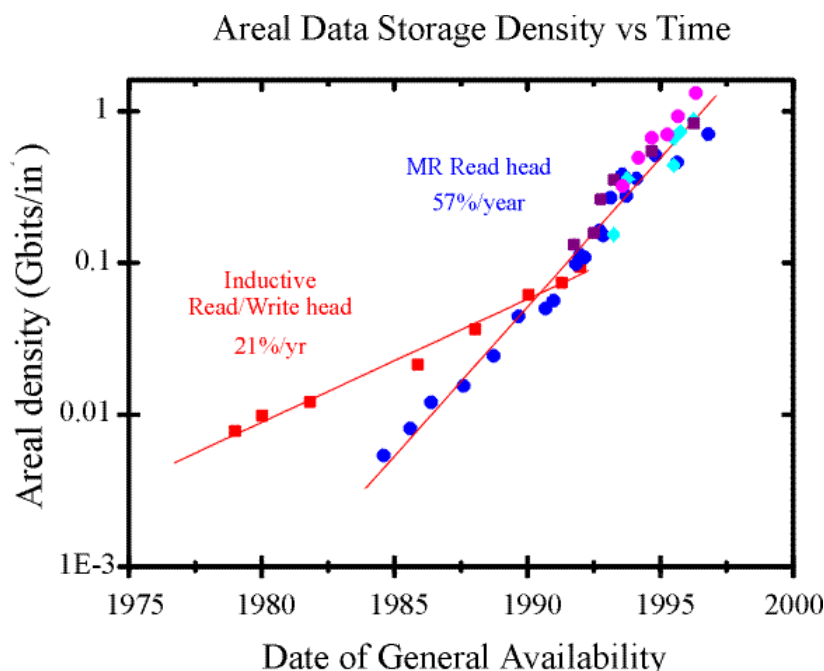
2.3), er man allerede nå tvunget til å se seg om etter alternativer til den fremgangsrrike CMOS-teknologien. Her ligger også en motivasjon til å se på nanoteknologien.



Figur 2.3. Utviklingstiden for prosessorchipene, fra første demonstrasjon av enkelttransistorer til markedsintroduksjon, er lang. Utfordringen blir større for mindre transistorer.

En tilsvarende utvikling observerer man i datalagringssystemer. I likhet med "Moore's lov", som beskriver den eksponentielle vekst i regnekapasitet som gjelder for halvlederkomponenter, har antallet gigabits som kan lagres per cm^2 i magnetiske media (harddisk) og antallet bits som kan lagres per lengdeenhet på magnetisk teip økt eksponentielt. For disklagring øker datatettheten med 57% per år. Med dagens 30 Gbits/inch² (2) observerer vi at en databit har en størrelse på ca. 140 nm x 140 nm, noe som nærmer seg nanoteknologiens magiske grense.

I Figur 2.4 vises utviklingen av bit-tettheten for magnetiske disketter fra 1978 til 1998. Siden 1998 har ikke utviklingen stått stille, men fortsatt langs den bratte røde linja.



Figur 2.4. Utviklingen av bit-tettheten for magnetiske media over tid. En fortsettelse av den bratte røde linje gir 30 Gbits/inch² i 2005. Den tettheten har vist seg å bli realisert i år

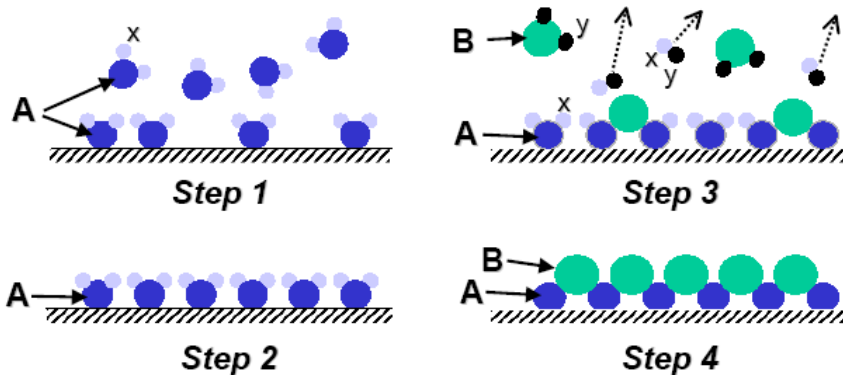
For magnetisk teip, med en lineær tetthet på 12330 bits/mm (2), er partikkelstørrelsen ca 80 nm i den retningen teipen dras under lesehodet. Bredden på teipen er selvfølgelig større. Når partikkelstørrelsen minker blir det magnetiske volumet mindre, noe som betyr et lavere nivå på utlesningssignalet. For å øke utlesningssignalet igjen må man la lesehodet fly enda litt lavere over teipen. Dette stiller enda større krav til utlesningsenheten. Et annet problem er at energiinnholdet i hver bit minker med volumet. Når det blir på størrelse med den termiske energien, kT , begynner bit-ene tilfeldig å snu magnetisk retning og den lagrete informasjonen blir borte. Også i denne lagringsteknologien forventer man at utviklingen skal ta slutt, i hvert fall når man fortsetter langs de linjer som er vanlige i dag.

3 BOTTOM-UP-TILNÆRMING

I motsetning til top-down-tankegangen, hvor man minker størrelsen på komponentene og på den måte nokså naturlig vandrer inn i nanometerområdet, kan man tenke seg å bygge opp strukturer ved bruk av grunnleggende byggeklosser; atomer og små molekyler. Atomer er små: Det minste atomet, hydrogenatomet, har en diameter på 0,1 nm (1 Ångstrøm). På denne måten begynner man på (sub)nanometerskala og prøver å sette sammen større strukturer, fra noen nanometer til titalls nanometer til kanskje 100 nm.

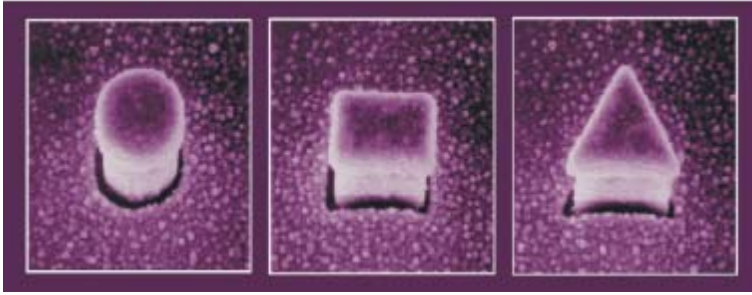
En metode som har vært kjent i lengre tid er "Molecular Beam Epitaxy", hvor man deponerer atomlag for atomlag på et substrat. På denne måten kan man lage strukturer som består av lag med forskjellige tykkelser, varierende fra nm til μm . I disse strukturene kan én romlig dimensjon være på nanometerskala mens de to andre dimensjonene er større. Eksempler på slike

strukturer er supergitre (super lattices) og kvantebrønner (quantum wells) som blir anvendt i halvlederlasere. Ved hjelp av kontroll på lagtykkelser og valg av lagmaterialer kontrollerer man laserens bølgelengde. Strukturene kan også anvendes som lysdetektorer, fra det synlige til det infrarøde området. Figur 3.1 viser hvordan kompliserte strukturer kan bygges opp ved å deponere atomlag for atomlag. Ved hjelp av denne groprosessen kan dimensjonen i groretningen kontrolleres på nanometernivået.



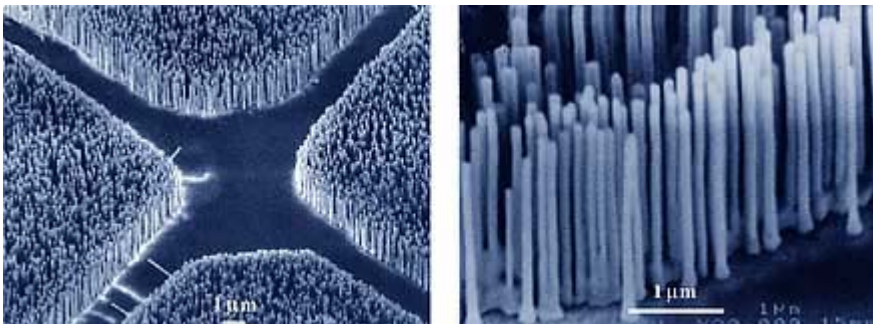
Figur 3.1. *Molecular Beam Epitaxy (molekylstråle-epitaksi), eller MBE, er en deponeringsteknikk som gjør det mulig å 'gro' materialer atomlag for atomlag. Man kan deponere lag av samme atomsort opp på hverandre eller variere atomsort. På den måte kan man lage skarpe grenseflater mellom materialer og gro tynne lag som muliggjør fremstilling av eksotiske strukturer av høy kvalitet.*

En variasjon av denne fremgangsmåten er å prøve å deponere, for eksempel med MBE, et material som har en annen naturlig atomavstand (gitterkonstant) når det er i krystallform enn substratets atomavstand. På grunn av de spenninger som oppstår kan det deponerte materialet organisere seg selv i små øyer i stedet for å belegge substratet homogent. Avhengig av vekstparametere, som for eksempel temperatur og tilførsel av materialer, kan det da dannes små krystallinske klumper (kvanteprikker eller quantum dots) som er nanometerstore i alle dimensjoner. Som oftest er disse kvanteprikkene dekket til med et annet material og ikke mekanisk tilgjengelig. Kvanteprikker kan anvendes som lysdetektorer og kilder. Figur 3.2 viser tre former av kvanteprikker som kan lages. Det interessante er at bølgelengden av det utsendte lyset fra en kilde basert på slike prikker kan bestemmes ved å kontrollere deres størrelse. I motsetning til bulkmaterialet, som bare kan emittere ved en bestemt bølgelengde, kan kvanteprikker laget av samme materialet, men som har ulike størrelser, lyse ved ulike bølgelengder. Likedan kan detektorer basert på prikker av ulik størrelse fange opp lys av ulike bølgelender. Dette har åpenbare anvendelser i kilde- og sensorsystemer.

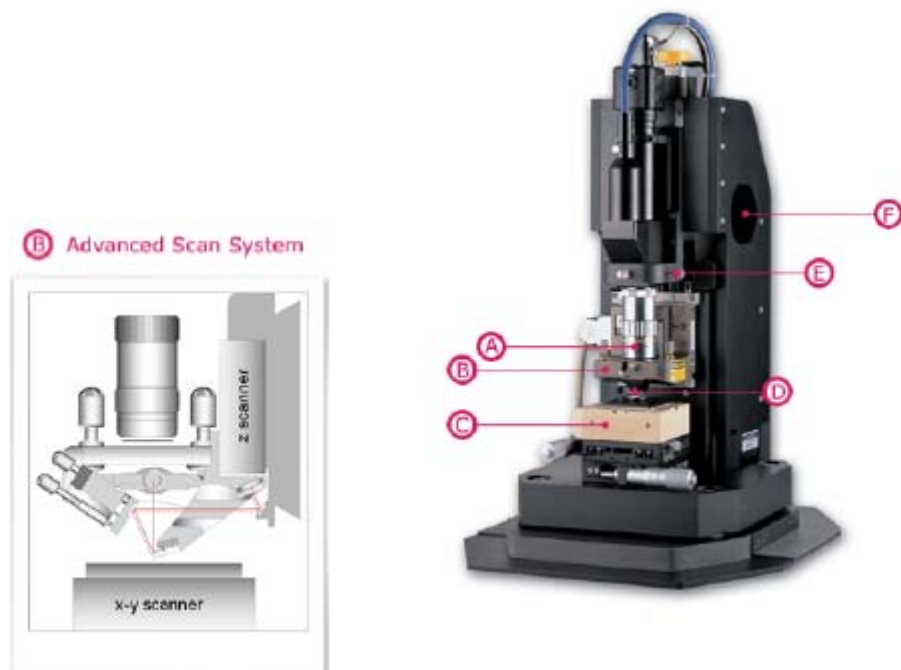


Figur 3.2. Kvanteprikker med ulik fasong. Den laterale størrelse er flere titalls nanometer.

Nanotråder (nanowires) er lange tynne tråder hvis diameter kan være fra noen få nm til noen få titalls nm, og som kan være flere μm lange. De vokser enten loddrett på substratoverflaten eller parallelt med det. Disse står eller ligger på overflaten og er da manipulerbare, dvs. man kan kontakte dem elektrisk eller bevege dem langs overflaten mot kontaktpunktene. Lykkes man med det har man plutselig muligheten til å måle strømmen gjennom tråden og studere dens egenskaper. Et eksempel på slike tråder er vist i Figur 3.3. Man kan tenke seg at et fremmed molekyl som hefter seg til tråden påvirker trådens elektriske ledningsevne, slik at man kan bruke tråden som en detektor av gass eller biologiske materialer. Siden man har millioner av slike tråder, kan det bli en nokså følsom detektor. Utfordringen ligger i å kontakte trådene og gjøre dem spesifikt følsomme for den agenten man prøver å detektere. Det er også mulig å definere områder (mønstre) på substratoverflaten hvor man ønsker at disse trådene skal gro og andre områder hvor man ikke ønsker vekst, såkalt selektiv vekst.



Figur 3.3. Eksempel på nanowires (nanotråder), i dette tilfellet laget av ZnO. Trådene er flere μm lange og har diametre som er flere titalls nm. Her står trådene loddrett på substratet. Det er også mulig å gro dem langs overflaten (liggende). Det venstre bildet viser muligheten for å kontrollere hvor trådene (ikke) skal gro.



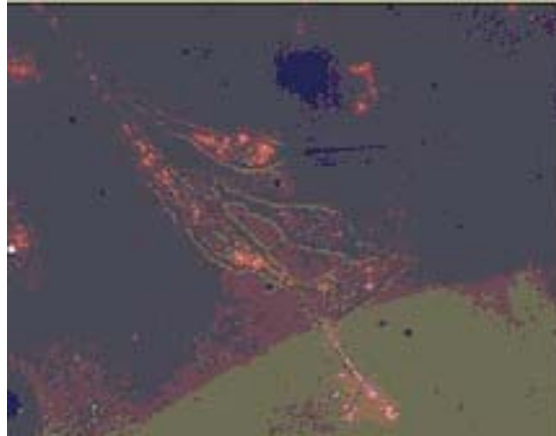
Figur 3.4. Eksempel på et Atomic Force Microscope (AFM), et instrument som brukes for å studere overflater med sub-nm høydeoppløsning. I tillegg kan instrumentet brukes til manipulasjon av små strukturer (nanotråder) på overflaten.

Et verktøy som har blitt en "enabling technology" er "atomic force microscope" (AFM), se Figur 3.4. Instrumentet har intet med atomkraft, mao. utvinning av energi ut av radioaktivt materiale, å gjøre. "Atomic force" referer til at instrumentet er i stand til å måle de naturlige tiltrekkende kreftene som finnes mellom atomer (van der Waalske krefter). En veldig spiss nål som er montert på en kalibrert fjær beveges over overflaten man ønsker å studere. Hver gang spissen nærmer seg overflaten, strekker fjæra seg og en laserstråle som treffer et speil som er montert på spissen beveger seg over en fotodetektor som dermed detekterer høydeforskjeller i overflaten. På den måten klarer man å avbilde overflaten og måle høydeforskjeller på nanometerskalaen. I tillegg kan instrumentet brukes for å mekanisk manipulere små objekter på overflaten eller skrive mønstre på overflaten som man da kan bruke for å definere kontakteringsområder. AFM er et eksempel på en klasse instrumenter som kalles "scanning probe microscopes", som kan brukes til avbildning, karakterisering og manipulasjon av overflatestrukturer. De fleste nanoteknologi programmer rundt om i verden setter av penger til støtte for utvikling av metrologi. Uten muligheter for å kunne kvantifisere avstander på nm-skala kan utviklingen av nanoteknologien brått stoppe opp.

Det er også mulig å bruke kjemiske fremstillingsmetoder for å lage partikler med en diameter på nanometerskala. Avhengig av partiklenes størrelse fluoriserer de ved ulike bølgelengder, noe som resulterer i ulike farger på løsninger med slike partikler. Videre er det mulig å belegge disse små kulene med et eller annet protein som er spesifikt for en bestemt type celler eller celleorganeller. Har man for eksempel proteiner som er spesifikke for en bestemt type kreftceller, kan man injisere kuler som selv finner disse kreftcellene i kroppen. Under belysning

med UV-stråling fluoriserer disse kulene og dermed er svulsten lokalisert. Denne type medisinske anvendelser har et stort potensial.

Cadmium-selenide (CdSe) nanopartikler som 'lyser opp' under en UV-lampe vises i Figur 3.5. Disse partiklene er injisert i vev, og deres bevegelse og eventuell målsøking (kreftceller) kan følges.



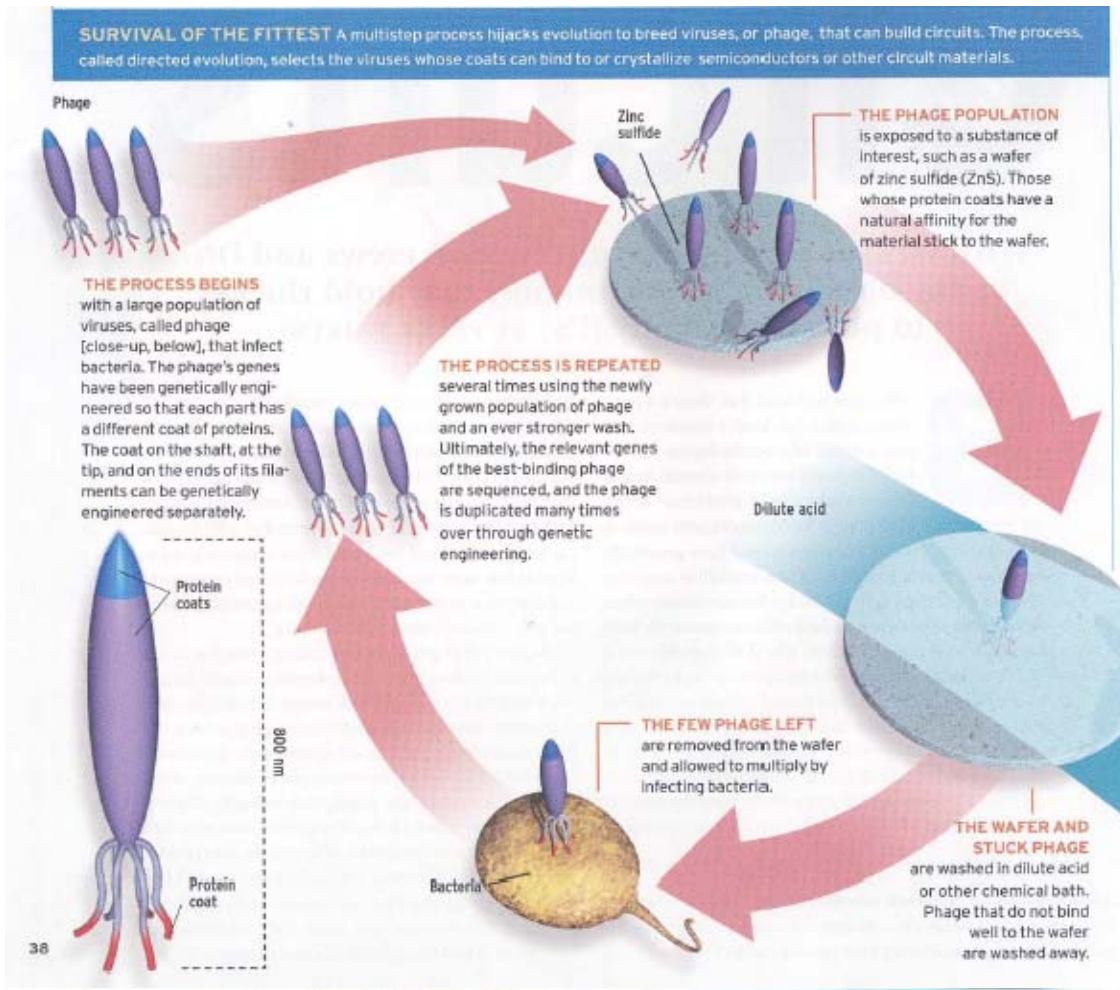
Figur 3.5. Fluoriserende CdSe nanopartikler, 5 nm diameter, som er belagt med proteiner, finner fram til spesifikke strukturer i levende vev via blodårene.

Partikler på nanometerskala er også egnet for katalysatoranvendelser. Små partikler har typisk en stor overflate/volumratio, slik at tilsetning av disse partiklene kan stimulere for eksempel forbrenningprosesser meget effektivt. Billakker som er tilsatt nanopartikler beskytter mot riper og varer lengre. Små, nanostrukturerte partikler i maling kan øke "stealth"-egenskapene til for eksempel skip og fly, både i radarbølglengde- og infrarødområdet.

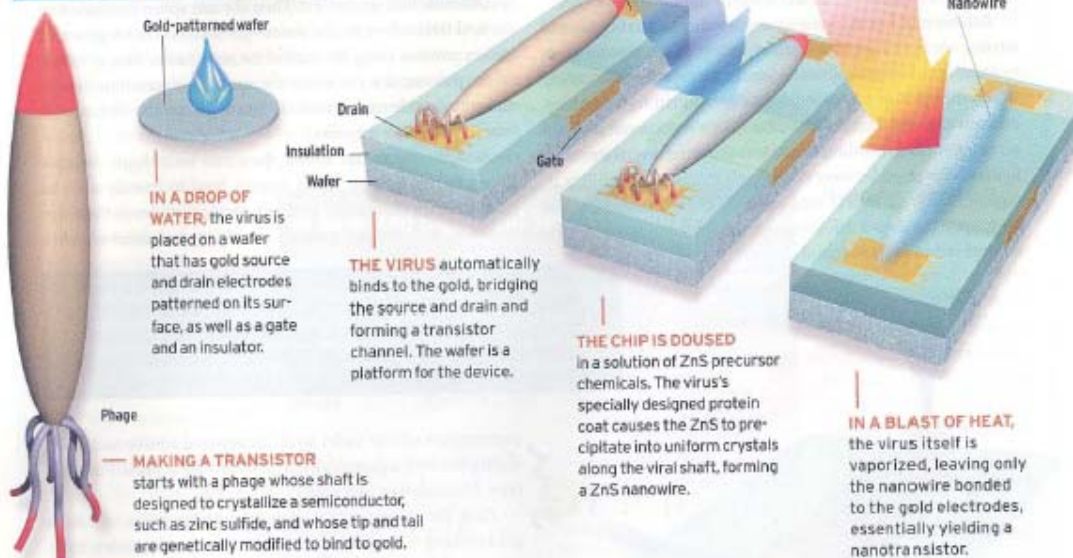
Blodanalyse eller DNA-analyse kan i fremtiden foretas raskere og fra mindre prøver. I "lab-on-a-chip"-systemer, som egentlig er mikrosystemer når det gjelder den totale størrelsen, er deler av overflaten preparert på nanometerskala. Dette er gjort på en slik måte at bestemte deler eller komponenter av materialet som undersøkes hefter seg lokalt til overflaten og blir registrert. På den måten kan sammensetningen av materialet bestemmes.

I nanoteknologi forsvinner grensene mellom de klassiske fagene fysikk, kjemi og biologi. Biologiske og ikke-biologiske materialer kan settes sammen med både kjemiske og fysiske teknikker. Dette er en følge av å jobbe på nanometerskala, og framheves ofte som en karakteristikk av nanoteknologi.

I andre teknikker som ligger i grenselandet mellom biologi, kjemi og fysikk brukes det virus i en prosess for å lage elektriske kontakter på en halvlederchip (8). En skisse som viser prosessen er gjengitt i Figur 3.6.

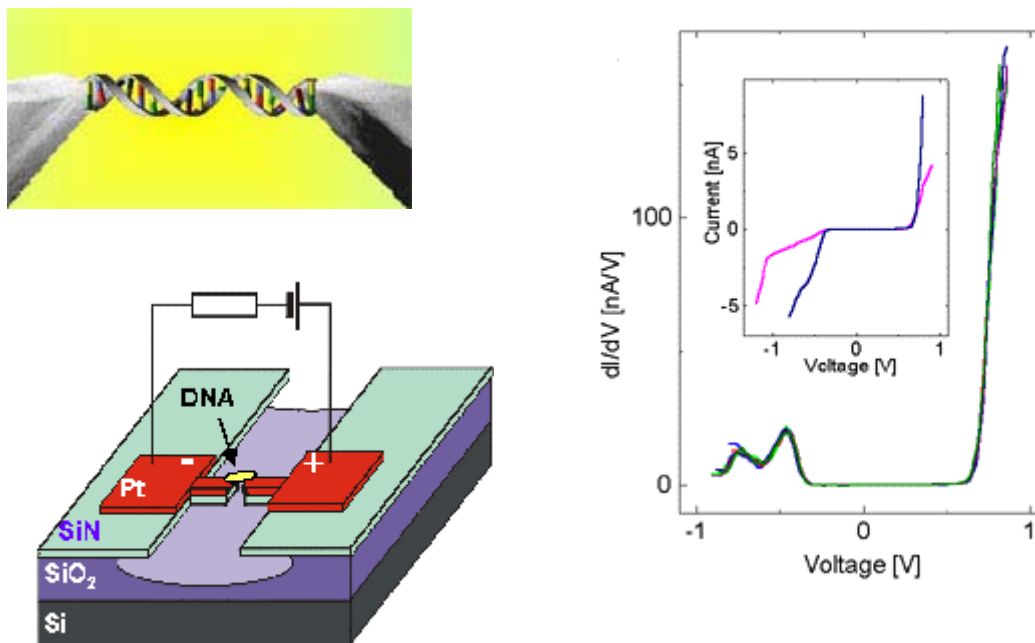


COMPUTER BUG The phage being engineered by MIT's Angela Belcher will be used to fabricate a transistor by crystallizing a semiconductor out of a precursor solution.



Figur 3.6. Via en akselerert evolusjonsprosess velges de virus som hefter seg (affinitet) best til en spesifikk halvlederoverflate ut. Når de i et senere prosesstrinn legger seg mellom gullkontakter kan halvledermaterialet fra en løsning hefte seg til virusets overflate og lage tynne halvledertråder mellom kontaktene.

Fabrikkeringsteknikker har kommet så langt at man kan lage elektriske kontakter med en avstand på noe titalls nm og så manipulere et stykke DNA-molekyl på plass over kontaktene. På den måten kan de elektriske egenskapene av DNA-molekylet karakteriseres, noe som kan fremme forskningen på DNA-molekylene (5). I Figur 3.7 vises en skisse av kontakter av platina (Pt), DNA-molekylet som danner en bro over kontaktene og spenningskilde og strømmåleren (til venstre), og en målt strøm-versus-spenningskarakteristikk (til høyre).

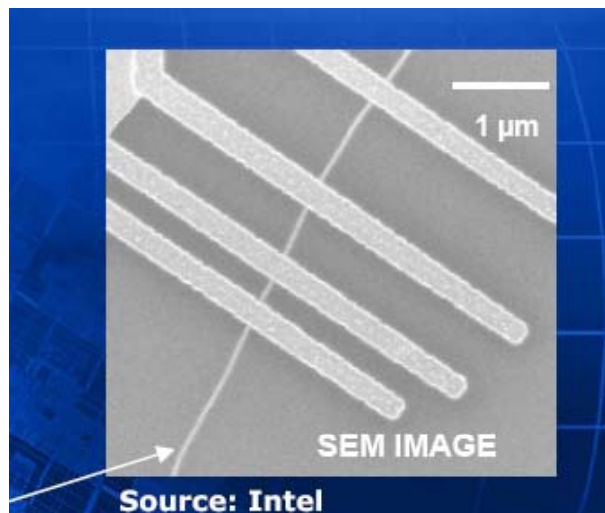
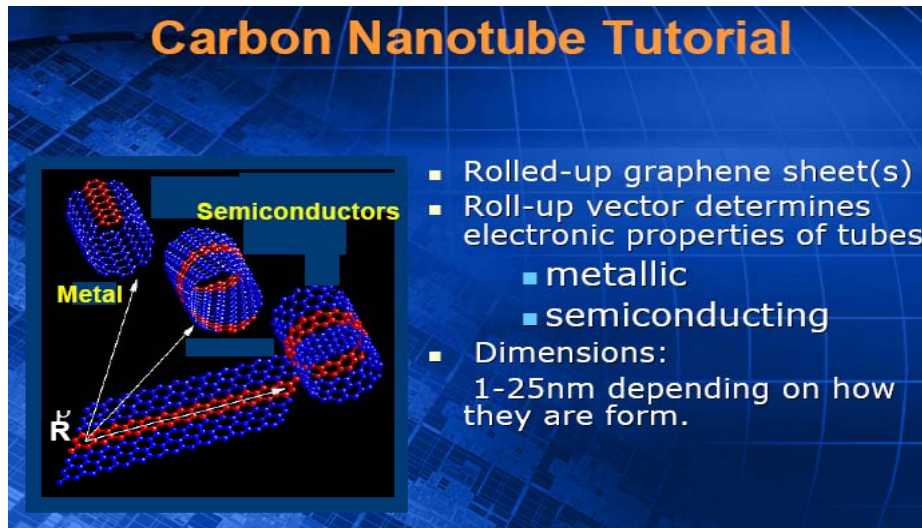


Figur 3.7. Framskritt i både prosesseringsteknikker og karakteriseringsteknikker gjør det mulig å kontakte ett og ett DNA-molekyl og måle deres ledningsevne. Dette kan gi informasjon om egenskapene til disse molekylene. En del av SiO_2 er etset bort og et tynt SiN membran henger over SiO_2 -kantene. Opp på membranet ligger kontakter av platina (Pt) og DNA-molekylet danner en bro over kontaktene. En karakteristikk av målt strøm gjennom DNA-et som funksjon av spenning er vist til høyre.

Et material som har fått mye oppmerksomhet er karbon-nanorør (carbon nanotubes). De mest kjente formene av karbon er blant annet diamant og grafitt, men mot slutten av 80-tallet ble det oppdaget molekyler som består av 60 karbonatomer (C_{60}), satt sammen som en fotball. Disse fikk navnet Buckminsterfullerene ('Bucky Balls'), oppkalt etter R. Buckminster Fuller. Disse og karbon-nanorør produseres når man brenner kull og er i så måte naturlige produkter, men de ble ikke oppdaget før ganske nylig. Rørene kan ha diametre ned til 1 nm og kan være flere mikrometer lange.

Et karbon-nanorør kan tenkes som å være et opprullet ark av graphene (se Figur 3.8). Rørenes egenskaper er avhengig av måten "arkene" rulles opp på. For eksempel kan ledningsevnen variere fra veldig god (metallisk) til mye mindre god (halvleder). Varianten med god

ledningsevne er tenkt å kunne brukes som ”interconnect”, en ledning mellom komponenter på en chip. Materialet tåler mye høyere strømtettheter enn dagens interconnectmetaller, aluminium og kobber. Rørene er også tenkt brukt i displayteknologier. Diametrene er så små at det kreves moderate spenninger for å emittere et elektron som treffer fosfor på skjermen og dermed danner et bilde som i vanlige tv-rør.

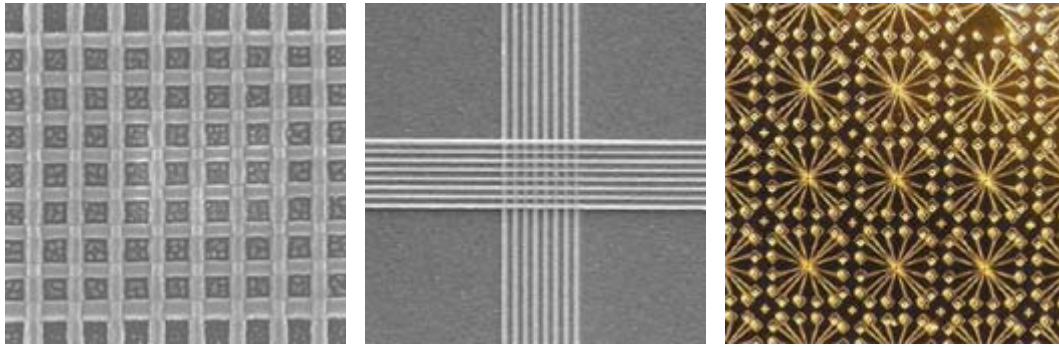


Figur 3.8. Karbon-nanorør er enda en ”ny” form av Karbon, etter diamant, grafitt og buckyballer (C60). Avhengig av hvordan rørene dannes varierer for eksempel ledningsevnen fra metallisk til halvlederaktig (øverst). Lange tynne rør kan kontaktes og deres elektriske egenskaper bli undersøkt (nederst).

I tillegg til disse elektriske egenskapene har rørene en enorm mekanisk styrke. De er 10-100 ganger sterkere enn stål og veier kun en sjettedel. Dette gjør at materialet egner seg i beskyttelsesanvendelser. Rørene kan blandes med andre materialer, og forhåpentligvis kombinerer komposittmaterialet de gode egenskapene fra komponentene.

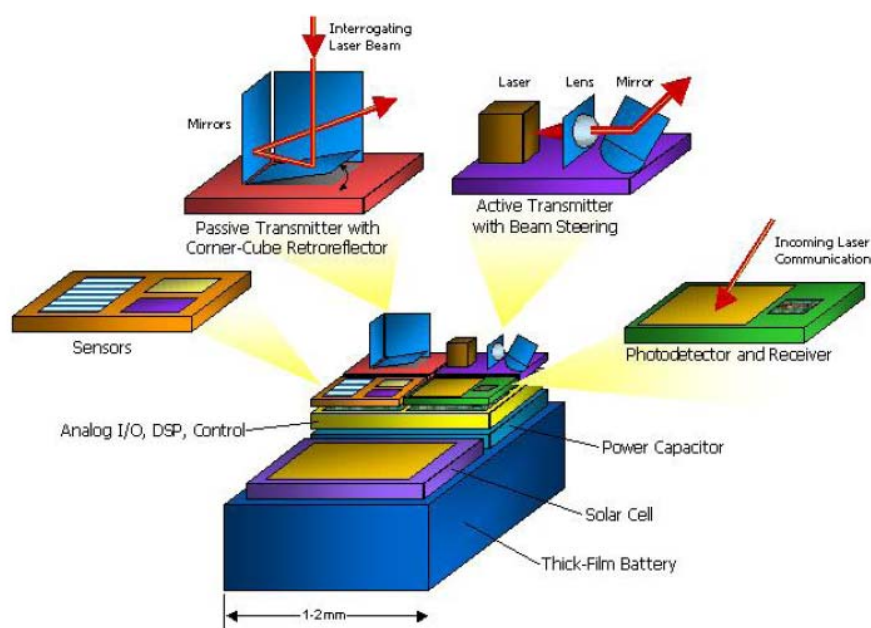
På systemnivå er det interessant å følge utviklinga hos Hewlett-Packard, hvor de i første

omgang satser på å lage en minnekrets, kalt "cross-bar latch", se Figur 3.9. Kretsen består av to lag med parallelle tråder (noen få nm brede, med noen få 10-talls nm avstand) som ligger opp på hverandre, krysset, med kontakt mellom lagene der hvor trådene krysser hverandre. Et slikt kontaktpunkt er et svitsjeelement. Trådene er definert med en "imprint"-teknikk, i motsetning til vanlig fotolitografi. Teknikken er ganske enkel og produserer relativt tettpakkede svitsjeelementer. Utfordringene ligger i begrensningen av defekter og grensesnittet mot eksterne kretser som er produsert med vanlig halvlederteknologi.



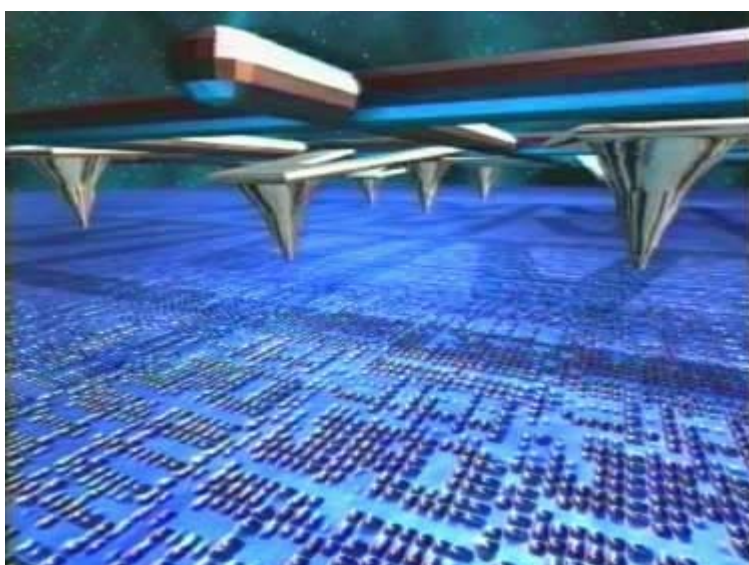
Figur 3.9 Cross-bar latch minnekrets. Kryssende tråder, 8 x 8, gir en 64-bits minnekrets. Fabrikkerings-teknikken ("imprint") er enkel men beheftet med defekter. Bildene viser kretsen med ulike forstørrelser.

Ofte blir begrepet "smart dust" (intelligent støv) nevnt i nanoteknologisammenheng. Konseptet, som vises i Figur 3.10, går ut på å bygge millimeterskala sensor- og kommunikasjonsplattformer som samarbeider i et selvorganisert, distribuert nettverk. Disse intelligente sandkornene skal ha regnekraft, toveis trådløs kommunikasjonsmulighet og innebygd energiforsyning, og de skal være billige nok at man kan produsere og anvende mengder av dem. Selve plattformen er relativt stor, men noe av komponentene (sensorer, energiforsyning osv.) kan dra fordel av nanoteknologiutviklingen.



Figur 3.10 *Intelligent støv eller "smart dust". Selve støvkornene er store (1 – 2 mm) i nanoteknologiforstand, men sensorelementene, energiforsyningen og andre komponenter har potensial for å kunne utnytte nanoteknologiens framskritt, særlig når det gjelder miniaturisering og materialer med skreddersyde egenskaper.*

På datalagring og -lesefronten finnes det planer om å benytte mange (1000 stk) "atomic force microscopes" for å skrive og lese data til og fra et medium. Med den høye oppløsningen som kan oppnås med et AFM er man garantert en høy bit-tetthet. Bruker man mange lese- og skrivehoder parallelt kan man kanskje oppnå en rimelig lese- og skrivehastighet. En såkalt "artist's impression" av et slikt system vises i Figur 3.11. Visjonen er å oppnå en tetthet som er 200 Gbits per inch².



Figur 3.11 *IBM's visjon på et framtidig datalagrings og -lesesystem. Her skal 1000 AFM-tupper lese og skrive data parallelt, med en tetthet som er 200 Gbit/inch²*

4 BEDØMMELSE AV NANOTEKNOLOGI

I flere europeiske land (England, Tyskland, Sveits, Nederland) og i EU har ulike institusjoner utført en evaluering av de mulighetene og problemene som nanoteknologi byr på¹. Senest har Norges forskningsråd publisert en rapport (6) som vurderer de ulike aspektene ved bruk av nanoteknologi og deres konsekvenser for samfunnet.

Det nederlandske Rathenau Instituut, som spesialiserer seg på å bedømme teknologi, har produsert en rapport (7) hvor det presenteres en tabell som oppsummerer forventningene til nanoteknologi. Tabellen, som for øvrig også dukker opp i NFR-rapporten, er gjengitt i tabell 4.1.

Imidlertid har det kommet fram en del forskningsresultater som viser at små partikler kan ha negative helsemessige konsekvenser. En kort oppsummering (3) følger:

- TiO_2 - og ZnO_2 -partikler som blir brukt i solkremer kan produsere frie radikaler som kan skade DNA
- Det har blitt observert at mindre partikler gir en større betennelsesreaksjon enn større partikler
- Karbon-nanorør er giftigere i muselunger enn kvartspartikler
- Nanopartikler av hydroxyapatitt, en vanlig bergart, hemmer levercellevekst
- Nanopartikler er i stand å bryte gjennom neseslimhinnen og blodhjernebarrieren for så å ende opp i hjernen
- Buckyballs gir hjerne- og DNA-skade i fisk.

I en rapport publisert av The Royal Society og The Royal Academy of Engineering (4) påpekes det at små (bl. a. nanometerstore) partikler fra for eksempel bileksos og gamle kulkraftverk har en negativ effekt på helsen. Denne effekten er sterkt avhengig av den totale dosen. Foreløpig er det liten sannsynlighet for at arbeidere i "nanoteknologifabrikker" blir eksponert for sykdomfremkallende doser av nanopartikler. Produksjonsvolumet anses rett og slett til å være for lite. Det gjentas her at lite er kjent om hvordan nanopartikler påvirker kroppens organer.

Utviklingene i nanoteknologi går for fort til at man i sanntid kan vurdere alle toksikologiske aspekter til de materialene som lages. Utredningen av konsekvensene før man får lov å gå videre med material- eller anvendelsesutviklingen kan være en stor bremsekloss som minker drivkraften i nanoteknologien.

¹ England – Parliamentary office of Science & Technology (1996)
EU – Scientific and Technological Options Assessment (2002)
Tyskland – Technikfolgen Abschätzungs Bureau (2003)
Sveits – TA-Swiss, Center for Technology Assessment (2003)
Nederland – Rathenau instituut (2004)

Anvendelse	Aspekt	Drømmescenario	Skrekkscenario
materialer & produksjon	helse, miljø, sikkerhet	bærekraft	nano-asbest
	selvproduksjon	personlig fabrikking	"Grey Goo" ²
elektronikk	personvern	intelligente produkter & omgivelser	Big Brother
bio-elektronikk	ingeniørkunst på mennesker	ingen funksjonshemninger	diskriminering
	blanding av levende / ikke-levende	kobling til Internett	dehumanisering
medisin	prediktiv medisin	tidligere diagnoser	genetisk tvang eksklusjon (forsikring)
militær	våpenkappløp	trygg verden	nye våpen, spredning
	krig etikk	fjernstyring	killer robots
	ingeniørkunst på mennesker	uovervinnelige soldater	cybersoldater
generelt / innovasjon	patenter	lik fordeling rikdom	monopolisering
	internasjonal utvikling	lik fordeling rikdom	"nano divide"
	styring/dialog	samfunnsmessig	teknologisk
	økonomi	vekst	nedgang

Tabell 4.1. Forventningene til nanoteknologi – både drømme- og skrekkscenarier.

5 DEN GLOBALE INNSATSEN

I USA brukes det årlig 1 milliard dollar på nanoteknologi, og tilsvarende beløp anvendes i Japan og EU til nanoteknologiforskning. Det antas at satsingene i Korea, Kina og på Taiwan også er store. I Japan og EU forventer man at nanoteknologiene vil bidra til en vitalisering av økonomien, og landenes styrende instanser legger stor vekt på en rask overføring av grunnleggende forskningsresultater til bedrifter som skal utvikle produkter.

Europeere gir uttrykk for at de vil være med på utviklingen innen nanoteknologi. I USA legger det offentlige mindre vekt på utvikling, men desto mer vekt på grunnleggende forskning. Det antas at private bedrifter før eller senere innser potensialet i forskningsresultatene og finansierer

² Omtalt i "Engines of Creation" av Eric Drexler (1986)

produktutviklingen selv. Mange store institusjoner i USA som bevilger forskningsmidler (National Science Foundation, National Institutes of Health, National Nanotechnology Initiative, Defense Advanced Research Projects Agency, National Aeronautics and Space Administration, National Institute of Standards and Technology) har nanoteknologiprogrammer. Her vil man gjerne lede, eller være i fronten av, utviklingen. I vedlegget for 2006-budsjettet blir også økonomisk konkurransevne nevnt som en drivkraft bak nanoteknologisatsingen.

6 MILITÆR NANOTEKNOLOGI

I USA anses nanoteknologi til å kunne bidra til en fortsatt overlegen militær kapasitet. To nasjonale institutter, Institute for Soldier Nanotechnologies (ISN) (<http://www.mit.edu/afs/athena/org/i/isn/>) og Center for Nanoscience Innovation for Defense (CNID, <http://www.engineering.ucsb.edu/Announce/cnid.html>) skal sikre at utviklinger innen nanoteknologi anvendes militært.

Utfordringen for ISN er beskrevet på deres nettside:

”Today’s dismounted infantry soldier carries a back-breaking load, usually 100 – 140 pounds, and still has insufficient ballistic protection, little defense against chemical and biological weapons, and too many pieces of equipment that don’t work well together. The ISN’s challenge is to transform today’s cotton/nylon fatigues and bulky equipment belts to a sleek, lightweight battlesuit that provides everything from responsive armor to medical monitoring to communication – and more – in one integrated system.”

I Figur 6.1 vises en modell hvor hvordan energiforsyning, sensorer og kommunikasjonsutstyr er integrert i påkledningen. Tilleggsfunksjoner er beskyttelse mot ABC-stridsmidler, eventuell medisiner og overvåking av soldatens tilstand/ytelsesevne.



Figur 6.1. Modellen viser hvordan den framtidige soldatens påkledning ser ut. Målet er å integrere beskyttelse, kommunikasjons-, monitorerings- og energiforsyningssystemer mest mulig og i tillegg redusere vekten.

Forventningen er at nanoteknologi kan bidra til å møte utfordringene på to måter: Gjennom miniatyrisering og utvikling av nye funksjonelle materialer.

Opprinnelig fokuserte den amerikanske nanoteknologiinnsatsen på grunnforskning. Etter hvert ble det oppfattet at det offentlige kanskje også burde stimulere utviklingsprosessen ved å sluse grunnforskningsresultater til bedrifter, særlig militær teknologibedrifter. CNID skal spille denne rollen.

Det svenske FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, har etablert Försvarets Nanoteknikprogram (<http://www.nanotek.se/sv/main.asp>) som har følgende programerklæring:

”Med hjälp av nanoteknik ska sensorer och skydd inom det nya nätverksbaserade försvaret förbättras. Förutom att sälla fram några lovande utvecklingsprojekt finns andra mål med satsingen:

- *internationella samarbeten och teknisk förnyelse inom försvarssektorn*
- *ökad samverkan mellan UoH, näringslivet och försvarsmakten*
- *att försvarsmakten utnyttjar ny teknologiska erfarenheter”*

Prosjektene det svenske forsvaret prioriterer, fokuserer på biosensorer, høytemperaturmaterialer for motorer, keramiske materialer for beskyttelse, multispektral deteksjon, ”se gjennom veggen”-sensorer, selvrensede overflater og sensorbeskyttelse. Innsatsen er foreløpig berammet på 100 millioner kroner over en femårsperiode.

I Storbritannia er innsatsen ca. £1,5 million per år. Ministry of Defence har utredet innvirkningen av nanoteknologi på det britiske forsvaret og kommentert denne. En del av denne reaksjonen er gjengitt:

”However, MOD will undertake Technology Watch of nanotechnology, both to determine its benefits for UK defence and to determine the threats that the technology might pose against the UK and its allies, recognising that they may come in key areas more quickly than we think. To be an effective technology watcher and obtain key information from the international research community in particular, MOD will need to sponsor some nanotechnology research.” ...

”Without the MOD having something to offer in exchange, it is unlikely that researchers will be prepared to share their key knowledge.”

7 OPPSUMMERING

Som gjengitt i tabell 2.1 har den internasjonale halvlederindustrien planer for videreutvikling av CMOS-teknologien, som er arbeidshesten i dagens prosessor- og minneteknologier, i hvert fall fram til år 2015. Industrien har vært utrolig dyktig til å følge de oppsatte utviklingslinjene i over 30 år, og det er ingen grunn til å tvile på at prosessorene og minnekretsene de kommende 10 åra

vil få økt klokkefrekvens og kapasitet etter planen. Utnyttelse av den økte ytelsen er også avhengig av programvareutviklingen. Programvareutviklingen er ikke påvirket av fremskritt i nanoteknologiene, men skjer parallelt.

Selv om transistorstørrelsen gradvis minkes blir ikke chipene mye mindre, ettersom transistortettheten (antall transistorer per arealenheter) samtidig øker. Den økte klokkefrekvensen medfører en økt varmeproduksjon som kan bli et problem. Den vanlige prosessorchipen blir dermed ikke mindre. På den andre siden blir det mulig å bruke færre transistorer som også er mindre, og likevel produsere en prosessorer som yter mer og er mindre enn tidligere. Nanoteknologiens innvirkning på prosessorytelsen er foreløpig ikke klar.

Fram til nå har elektronets ladning vært representativ for den informasjonen man ønsker å manipulere – signalene er enten strøm eller spenning. Alternative tilstandsvariabler kan være elektronets spin, fase, kvantetilstand, mekaniske deformering e.l. Av disse har så langt ”spintronics” og ”entangled photon states” blitt større forskningsfelt. Kvanteregning, basert på massiv parallell behandling av data, og kryptering (sikker kommunikasjon) er noen av anvendelser.

Framtida for magnetisk datalagring er ikke så godt beskrevet som prosessorutviklinga. Pris (per megabyte), tetthet (Mbit/inch²) og datarate (Mbyte/s) er viktige parametere for konsumentene, men også for produsentene fordi de bestemmer lønnsomheten. Forventningen er at den eventyrlige veksten vil avta først. Dataratene som de magnetiske medier kan leses med øker raskere enn halvlederteknologien klarer å håndtere. Det har vært en del spådommer om teknologiens ende, både ved 2, 7 og 130 Mbits/ inch², men med dagens tettheter som overstiger 1 Gbits/ inch², har man blitt mer forsiktig. Likevel forventes at andre teknologier (ikke-magnetisk, holografi, atomnivå) må overta. Den sistnevnte er innenfor nanoteknologidomenet. Et annet alternativ er det nevnte ”cross-bar latch”-minnet som utvikles av Hewlett Packard.

De helsemessige konsekvensene av interaksjonen mellom små (nano-) partikler og menneskelig vev er tema for flere forskningsprosjekter, og noen resultater viser til negative effekter. Selv fredelige anvendelser av nanoteknologier kan gi negative helsemessige konsekvenser. Noe av kjemien for å lage nanopartikler er ikke komplisert, og det krever sannsynligvis ikke store ressurser for å komme i gang med selve partikkelproduksjonen.

Mulighetene for å forbedre ”stealth”-egenskapene til fly, skip og autonome farkoster er en fordel for egne systemer, men naturlig nok også en ulempe hvis man skulle prøve å detektere fiendtlige systemer. Liknende observasjoner kan man gjøre når man tenker på nye sensorsystemer som nanoteknologier har ambisjoner om å utvikle.

I medisinske anvendelser av nanoteknologi tenker man på selvreparerende vev og sterke muskler samt forbedret diagnostikk. I kombinasjon med visjonene som ligger bak det amerikanske Institute for Soldier Nanotechnologies kan man spekulere i at framtidige soldater, utstyrt med mange sensorer både i kroppen og på påkledningen, kan monitoreres og deres innsats

fjernstyres, avhengig av kroppens tilstand og behov for aksjon/respons.

Med forbedrede teknikker for både å kunne manipulere og analysere små strukturer blir manipulasjon og analyse av for eksempel DNA mye lettere. Det blir lettere å bestemme egenskapene til levende organismer, noe som har både positive (helbreding av sykdommer) og negative (motstandsdyktige bakterier, dødelige virus) utslag.

Foreløpig står nanoteknologien ved begynnelsen, og antallet kommersielle suksesser er beskjedent. Men utviklingen går fort, oppmerksomheten som teknologien får er nå stor, og myndighetene i de fleste land har store forventninger til nanoteknologi og legger til rette for at teknologien overføres raskt til produktutviklere. Det økonomiske potensialet anses til å være stort.

Den store samfunnsdebatten om nanoteknologi har så vidt kommet i gang i flere land. Stort sett er kunnskapen om nanoteknologi blant lekmenn begrenset. Generelt ønsker man å unngå det generelt negative omdømmet som genteknologien fikk i den offentlige debatten. Farene som genteknologien muligens medførte ble av mange ansett som å være større en gevinsten.

Litteratur

- (1) International Technology Roadmap for Semiconductors, 2004 Update, <http://public.itrs.net/>
- (2) IBM, Almaden Research Center: <http://www.almaden.ibm.com/st/magnetism/ms/index.shtml>
- (3) Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (2004): Hoe groot kan klein zijn?, Nederland, november 2004
- (4) The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004): Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties, UK, juli 2004
- (5) Delft University of Technology: <http://www.mb.tn.tudelft.nl/SingleDNAmolexp.html>
- (6) Norges forskningsråd (2005) Nanoteknologier og nye materialer: Helse, miljø, etikk og samfunn, februar 2005
- (7) R. van Elst et al (2004): Om het kleine te waarderen, Rathenau Instituut, Nederland, 2004
- (8) IEEE Spectrum (2004): Survival of the fittest, p. 36, november 2003