

# NÄKYMIÄ NANOAIKAKAUTEEN

## Nanoteknologia, tunnelointimikroskoopit ja atomivoimamikroskoopit

Kati Rissa & Katja Juhola

**Nanoteknologialla tarkoitetaan kykyä valmistaa tuotteita atomiresoluution tarkkuudella. Nanolaitteen koko on tyypillisesti alle 1000 nm, ja jokaisella laitteen atomilla on määrätty tehtävä. Nanoteknologia on uusi voimakkaasti kehittyvä tieteenala ja sen historia on vielä varsin lyhyt. On arveltu, että kehittyvät nanotekniset sovellukset mahdollistavat uusia ratkaisevia edistysaskeleita useilla aloilla elektroniikasta lääketieteeseen.**

Nano on kreikkaa ja tarkoittaa kääpiötä. Nanoteknologiassa pyritään valmistamaan ja hyödyntämään erittäin pieniä mekaanisia rakenteita, sähköä johtavia komponentteja ja työkaluja. Kun tutkitaan alle mikronin kokoisia rakenteita, katoaa ennen niin selvä raja-aita fysiikan, kemian, molekyylibiologian, elektroniikan ja informatiikan välillä. Siksi nanotekniikka on luonteeltaan poikkitieteellistä. Nanotekniikka voi tarjota mahdollisuuden uusien materiaalien ja elektroniikan komponenttien räätälöintiin erillisiä atomeja ja molekyyliä siirtämällä.

Jokainen tuote ja materiaali koostuu atomeista. Tuotteen ominaisuudet riippuvat voimakkaasti atomien järjestäyty-

misestä, esimerkiksi hiiliatomeista voidaan kidehilaa järjestelmällä saada timanttia, grafiittia tai fullereenia. Tänä päivänä käytössä olevat valmistusmenetelmät, kuten valaminen, hionta ja sorvaus, ovat molekyyllitasolla hyvin karkeita ja epätarkkoja menetelmiä. Nykyään halutaan valmistaa yhä pienempiä ja pienempiä koneita. Nanokoneet ovat oikeastaan pienimpiä mahdollisia koneita, koska niissä jokainen atomi on sijoitettu tarpeen mukaan tiettyä tehtävää suorittamaan.

Nanoteknologia noudattaa fysiikan ja kemian lakeja, jotka tarjoavat hyvin monipuoliset mahdollisuudet atomien uudelleenjärjestelyyn. Nanotekniset ongelmat johtavat oleellisesti uuden-

tyyppisiin materiaalitekniisiin ongelmiin. Niiden ratkaisemisessa ei voida käyttää perinteisiä malleja, koska atomitasolla hallitsevat vuorovaikutukset poikkeavat oleellisesti makromaailman vuorovaikutuksista. Nanoteknologia tarjoaa mahdollisuudet uuteen teolliseen vallankumoukseen edellyttäen kuitenkin laajaa yhteistyötä poikkitieteellisen unelman saavuttamiseksi. Luonto on luonut erilaisia nanorakenteita vuosituhansien ajan. Biologiset systeemit ovat elävä todiste nanoteknologiasta ja ne tarjoavat monia nerokkaita ratkaisuja nanotekniisiin ongelmiin, kuten solujen energiatalous, viestintä- ja tasapainojärjestelmät sekä kyky itsensä monistamiseen.

## **Elektronimikroskoopista tunnelointimikroskooppiin**

Vuonna 1931 kehitettiin ensimmäinen elektronimikroskooppi. Tämä merkitsi paljon suurempien suurennosten kuvaamista kuin optisella mikroskopialla oli mahdollista saavuttaa. Nanoteknologian historian voidaan varsinaisesti katsoa alkavan vuodesta 1959, jolloin Richard Feynman esitti, että jonain päivänä laitteita voitaisiin valmistaa atomiresoluution tarkkuudella, eivätkä fysiikan lait poissulje tällaista materiaalien käyttöä. Vuonna 1974 Norio Taniguchi käytti sanaa nanoteknologia kuvatessaan alle mikrometrin kokoisia rakenteita.

Ehkä merkittävin käännekohta nanoteknologiassa oli ensimmäisen tunnelointimikroskoopin (*scanning tunneling microscope*, STM) valmistuminen 1980-luvun alussa. Vasta tällä välineellä kyet-

tiin kuvaamaan ja tutkimaan yksittäisiä atomeja. Tunnelointimikroskoopin kehittivät vuonna 1981 IBM:n laboratoriossa tutkijat Gerd Binnig ja Hienrich Rohrer. Keksintö arvioitiin niin merkittäväksi, että he saivat siitä vuonna 1986 Nobelin fysiikan palkinnon yhdessä ensimmäisen elektronimikroskoopin kehittäneen Ernst Ruskan kanssa. Samana vuonna ilmestyi myös MIT:n tutkijan Eric K. Drexlerin kirjoittama nanoteknologiaa tunnetuksi tekevä kirja *Engines of Creation*. Nanoteknologia oli tehty kertaheitolla tunnetuksi ja siihen asetettiin suuria odotuksia.

Odotusten lunastaminen vei kuitenkin aikaa. Alan ensimmäisenä merkittävänä konkreettisena saavutuksena – ja jälleen kerran paljon julkisuutta saaneena toimena – oli maailman pienimmän mainoksen valmistuminen vuonna 1989. Donald M. Eigler kirjoitti yhtiönsä nimen (IBM) yksittäisillä ksenonatomeilla. Tunnelointimikroskoopin avulla ksenonatomit siirrettiin erilliskiteinä nikkeli-pinnalla 4 K:n lämpötilassa, eli Kelvinin asteikolla mitaten neljä astetta absoluuttisen nolapisteen yläpuolella. Eiglerin teolla oli myös laajempaa merkitystä: nyt todettiin, että tunnelointimikroskooppia apuvälineenä käyttäen oli mahdollista työskennellä nanotasolla.

## **Tunnelointimikroskooppi ja atomivoimamikroskooppi**

Kokeellisten tieteiden edistyminen perustuu taitoon valmistaa yhä tarkempia mittalaitteita. Tähtitieteen ja kellojen samanaikainen kehitys keski- ja uuden-

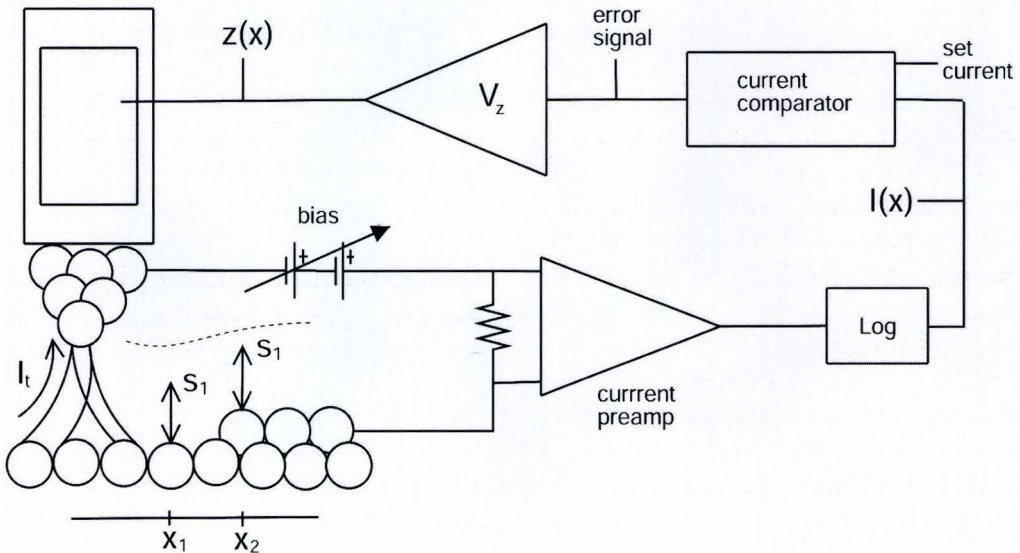


ajan taitteessa on tästä hyvä esimerkki. Nyt atomivoima- ja tunnelointimikroskooppien kehitys tarjoaa mahdollisuudet nanoteknologian kehitykseen. Niiden avulla voi kirjaimellisesti tarttua yksittäisiin atomeihin ja molekyyliin ja käyttää niitä rakennuspalikoina. Tunnelointimikroskooppi oli ensimmäinen mikroskooppi, jolla oli mahdollista tutkia pinnan atomirakennetta. Sen rajoitteena on kuitenkin sen soveltuminen vain sähköä johtavien näytteiden tutkimukseen. Tarve tutkia myös sähköä johtamattomien materiaalien atomirakennetta johti ensimmäisen atomivoimamikroskoopin (*atomic force microscope*, AFM) kehittämiseen vuonna 1986.

Tekniikka on kehittynyt edelleen huimaavaa vauhtia, ja nykyään STM ja AFM kuuluvat monipuoliseen mikroskooppien ryhmään, joilla voidaan tutkia hyvin monenlaisia materiaalien pintaominaisuuksia, kuten esimerkiksi

mekaanisia, kemiallisia, sähköisiä ja magnettisia ominaisuuksia. Mikroskooppiryhmä tunnetaan nimellä SPM (*scanning probe microscopy*), joka vapaasti käännettynä tarkoittaa pyyhkäisy-sensorimikroskooppia.

Tunnelointimikroskoopissa hyvin terävä metallikärki ja sähköä johtava näyte tuodaan noin nanometrinen päähän toisistaan, jolloin elektronit alkavat 'tunneloitua' joko kärjestä näytteeseen tai päinvastoin esivirrasta riippuen. Syntyvä tunnelointivirta muuttuu kärjen ja näytteen etäisyyden muuttuessa ja tätä signaalia käytetään kuvanmuodostuksessa. Alla olevassa kuvassa on kaavioesitys tunnelointimikroskoopin toimintaperiaatteesta. Tunnelointivirta  $I_t$  riippuu eksponentiaalisesti kärjen ja näytteen etäisyydestä, mikä mahdollistaa STM:n erinomaisen erotuskyvyn. Kun kärki liikkuu kohdasta  $x_1$  kohtaan  $x_2$ , virta lisääntyy kärjen ja näytteen etäisyyden pienentyessä näytteen topo-

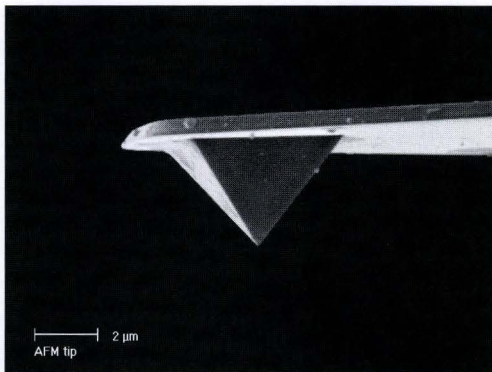


grafian muuttuessa. Virran lisääntymisen seurauksena säätöpiiri siirtää näytettä pois päin kärjestä kunnes erosignaali on jälleen nolla. Kolmiulotteinen kuva saadaan, kun määritetään skannerin korkeuden muutos paikan funktiona  $z(x,y)$ .

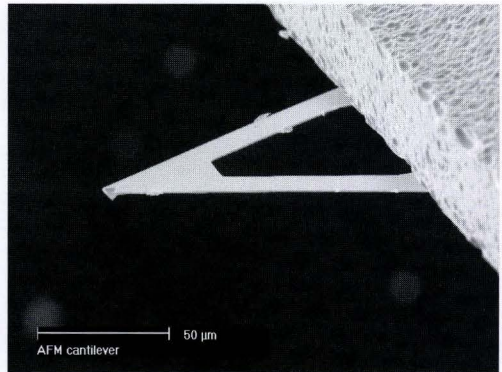
Atomivoimamikroskooppi toimii puolestaan periaatteessa samoin kuin perinteinen levysoitin. Näytteen pintaa skannataan hyvin terävällä kärjellä, joka on kiinnitetty joustavan kannattimen (*cantilever*) päähän. Kärki ja näytteen pinta ovat niin lähellä toisiaan, että niiden välillä vaikuttavat vuorovaikutusvoimat taiputtavat kärjenkannattinta kohti näytettä. AFM:n optinen tunnistinjärjestelmä mittaa kärjenkannattimen taipuman. Sen fotodiodi pystyy tunnistamaan jopa 0,01 nanometrin taipuman. Pietosähköinen skanneri liikuttaa joko näytettä tai kärkeä kolmessa suunnassa (XYZ). Kolmiulotteinen AFM-kuva muodostuu, kun mitataan sekä pietoskannerin liikettä että kärjen kannattimien heijastuksia sen taipuessa.

Näytteen ja kärjen keskinäisiin vuorovaikutuksiin vaikuttaa lukuisia voimia. Tyypillisimpiä ovat elektrostaattiset voimat, steeriset voimat, kapillaarivoimat ja lyhyen kantaman van der Waals -voimat. Voimien vaikutus riippuu suoraan kärjen ja näytteen välisestä etäisyydestä. Näitä attraktiivisia ja repulsiivisia voimia hyödynnetään atomivoimamikroskoopin eri tekniikoissa.

Kontaktitekniikassa (*contact AFM*) kärki on fyysisessä kontaktissa näytteen pinnan kanssa. Kärjenkannattimen jousivakio on alhaisempi kuin näytteen pinnan atomeja yhdessä pitävä voima. Repulsiivinen voima kärjen ja näytteen välillä aiheuttaa kannattimen taipumisen eikä materiaalia siirry kärjen ja näytteen välillä. Mitä pienempi välimatka näytteen ja kärjen välillä, sitä suurempi on repulsiivinen voima. Kontaktivoimaa säädellään kärjenkannattimen heijastusten takaisinkytkentäsignaalilla, jolloin saadaan informaatiota myös pinnan topografiasta.



a)



b)

Pyyhkäiselektronimikroskoopilla otettuja kuvia atomivoimamikroskoopin pyramidin muotoisesta kärjestä (a), joka on kiinnitetty joustavan kannattimen (b) päähän.



Kontaktiton AFM (*non-contact AFM*, NC-AFM) on värähtelevään mittakärkeen perustuva tekniikka. Värähtelyliike tapahtuu attraktiivisella alueella ja kokonaisvoima on paljon alhaisempi kuin kontaktitekniikassa. Koska näytteen ja kärjen välillä ei ole kontaktia, hyvin pehmeitäkin näytteitä voidaan tarkastella. Kontaktittoman atomivoimamikroskoopin herkkyyttä rajoittaa kuitenkin pienten vaikuttavien voimien mittaamisen hankaluus, eli NC-AFM:llä ei ole mahdollista saavuttaa alle nanometrin resoluutiota. Vastaava värähtelyyn perustuva tekniikka on ns. tapping-kuvaus (*TappingMode™ AFM* tai *intermittent-contact AFM*, IC-AFM), jossa värähtelevä kärki vain juuri ja juuri koskettaa pintaa värähtelyliikkeen alaosennossa. Värähtelyamplitudi muuttuu kärjen ja näytteen etäisyyden muuttuessa ja kuvanmuodostus tapahtuu mittaamalla näitä muutoksia. IC-AFM on tällä hetkellä varmastikin käytetyin menetelmä, koska sillä on mahdollista saavuttaa lähes yhtä hyvä resoluutio kuin kontaktitekniikalla näytettä vahingoittamatta.

Atomivoimamikroskoopista on kehitetty lukuisia muita mikroskooppeja. On esimerkiksi mahdollista määrittää samanaikaisesti pinnan topografiaa ja kitkamuutoksia pinnalla käyttämällä kontaktiatomivoimamikroskooppia ja kitkavoimamikroskooppia (*lateral force microscopy*, LFM). Tällä nanotribologisella menetelmällä mitataan lateraalivoimien aiheuttamia kärjenkantatimen kiertymisen heijastuksia. LFM:llä voidaan erottaa tasaisesta pinnasta erot materiaalikoostumuksessa ja ideaalitapauksessa jopa määrittää pinnan kitkakerroin.

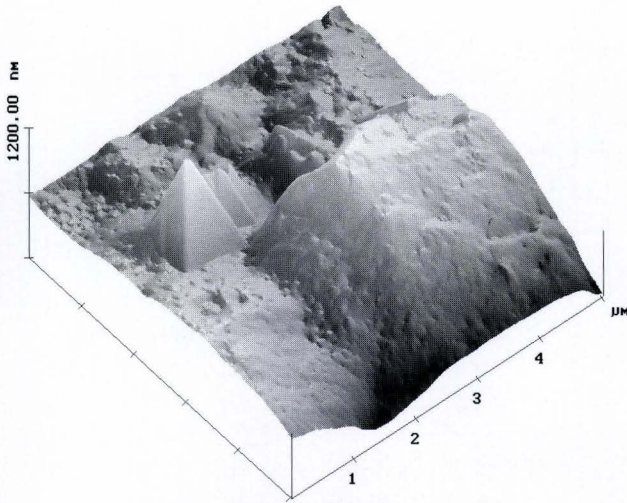
Värähtelevään kärkeen perustuvaan NC- tai IC-atomivoimamikroskooppiin liitetään nykyään usein ns. faasikuvaus (*phase detection microscopy*, PDM), jolla voidaan kartoittaa pinnasta koostumusmuutoksia sekä adheesion, kitkan ja viskoelastisuuden muutoksia. Magneettivoimamikroskooppi (MFM) mittaa ferromagneettisella kärjellä yli 10 nm pinnan yläpuolella dominoivia magneettivoimia ja niiden jakaumaa kontaktittomassa mittauksessa. Kärjen ja näytteen etäisyyden vaihtelut muuttavat magneettikenttää, mikä puolestaan aiheuttaa muutoksia kärjen resonanssitaajuudessa. MFM:llä on mahdollista analysoida eri materiaalien mikromagneettisia rakenteita tai vaikkapa kovalevyyn urien etäisyyksiä.

## Kohti käytännön sovelluksia

Atomivoima- ja tunnelointimikroskooppien kehitys on tuonut mukanaan myös hyvin erilaisia sovelluskohteita. Nanoteknologiassa niitä hyödynnetään paitsi rakenteiden kuvaamiseen ja ominaisuuksien karakterisointiin myös nanorakenteiden konstruointiin. On kuitenkin todella vaikeaa kerrostaa atomeita haluttuun kolmiulotteiseen muotoon, sillä ne värähtelevät ja ovat epävakaita. Lisäksi tunnettu materiaalfysiikka ei enää täysin toimikaan atomitasolla.

Tunnelointimikroskoopin (STM) kärjen adsorbaattiatomiin kohdistaman voiman suuruutta ja suuntaa voidaan muuttaa säätämällä kärjen paikkaa ja jännitettä. Kärjellä voidaan näin siirtää atomeita pinnassa. Ensimmäinen tällä menetelmällä tehty toimenpide oli edel-





Atomivoimakuvitus otettu kuva vesipohjaisesta barrierpäällysteestä. Pyramidin muotoinen kärki ei ole pystynyt seuraamaan terävän pigmenttipartikkelin reuna.

lä mainittu ksenon-atomeista koostuva IBM-teksti. IBM:n tutkimuslaboratoriossa Zürichissa rakennettiin myös maailman pienin helmitaulu, jossa helminä käytettiin yksittäisiä fulleriinimolekyylejä, joiden halkaisija on alle yhden nanometrin. Kuparipinnalle tehtiin kymmenen yhden atomikerroksen syvistä uraa, joista jokainen toimi kymmenen molekyylin ohjurina. Laskutoimitukset tehtiin huoneenlämpötilassa siirtämällä molekyyliä urissa ja kuvaamalla pinnasta sitten laskun lopputulos kuten tavallisella helmitaululla.

Cornellin yliopiston fysiikan professori Wilson Ho ja hänen assistenttinsa Hyojune Lee osoittivat vuonna 1999, että  $\text{Fe}(\text{CO})$ - ja  $\text{Fe}(\text{CO})_2$ -molekyylejä voidaan muodostaa siirtämällä hiilimonoksidimolekyylejä yksi kerrallaan rauta-atomiin. Tunnelointimikroskoop-

piä käytettiin sidoksen muodostumisen manipuloinnissa sekä tuotteiden rakenteen ja värähtelyominaisuuksien analysointiin. Rauta-atomit höyrytettiin (110) hopeapinnalle 13 K:n lämpötilassa. Hiilimonoksidimolekyylejä siirrettiin pinnalla STM:n kärjellä ja sidottiin rauta-atomiin, jolloin muodostui  $\text{Fe}(\text{CO})$ -molekyylejä. Kun tähän molekyyliin siirrettiin toinen CO-molekyylejä, muodostui vastaavasti  $\text{Fe}(\text{CO})_2$ -molekyylejä. Kemiallisten sidosten rakentaminen tällä menetelmällä auttaa visualisoimaan ja ymmärtämään paremmin sidosten olemusta.

Teknillisen korkeakoulun kylmälaboratoriossa on kehitetty menetelmä, jossa NC-AFM:llä pystytään siirtämään nanometallipartikkeleita ja samalla kuvaamaan liikutustapahtumaa. Tällä menetelmällä on onnistuttu rakentamaan yksittäiselektronitransistori (*single electron transistor*, SET) siirtämällä 400 nm pitkän ja 20 nm paksun hiilinanoputken kahden kultaelektrodin väliin. Hiilinanoputket ovat joko johtavia tai puolijohtavia niiden kiertosäteestä riippuen, mikä mahdollistaa transistorien ja kytkinelementtien rakentamisen nanomittakaavassa.

Pohjois-Carolinan yliopistossa on kehitetty laitteisto, nanoManipulator (nM), joka luo mikroskopiaan virtuaaliodellisuusliitännän. AFM:n tai STM:n käyttäjä voi tuntea virtuaalisesti olevansa kosketuksissa atomitason pinnan kanssa ja manipuloida sitä. Tällä systeemillä on tutkittu nanoputkien sähköisiä ja mekaanisia ominaisuuksia, kolloidisia metallipartikkeleita, DNA-ketjujen murtolujuutta sekä erilaisten bakteerien ja molekyylien mekaanisia ominaisuuksia.



"Dip-pen"-nanolitografiassa (DPN) AFM:n kärjellä siirretään molekulaarinen "muste" substraattipinnalle. Menetelmään perustuvia nanoplottereita, jossa AFM-kärkiä on järjestetty rinnakkain, on kehitteillä ja myös erilaisia materiaaliyhdistelmiä tutkitaan.

AFM:n kannattimeen liitetyllä timanttikärjellä on myös mahdollista painaa näytteen pintaan jälkiä halutulla voimalla ja samantien tutkia näitä jälkiä. Kovuusmääritysten lisäksi on mahdollista tehdä nanokulutuskokeita. Erityisesti ohutkalvojen tutkimuksessa nanokovuusmittausten ja -kulutuskokeiden mahdollisuus on tärkeää, sillä kalvojen mikroskooppiset ominaisuudet hyvin usein eroavat vastaavien materiaalien makroskooppisista ominaisuuksista. Näitä menetelmiä on hyödynnetty myös polymeerien ja biologisten näytteiden tutkimuksessa.

## Nanoteknologian mahdollisuuksia

Viime vuodet ovat olleet nanoteknologian kehitykselle ja tutkimukselle merkittävää aikaa. Erityisesti Yhdysvalloissa panostus on ollut mittavaa. Yhtenä käännteentekevänä tutkimustyön tuloksena oli vuonna 1999 Rice Universityn ja Yale Universityn tutkimusprojektien osoitus siitä, että yksittäinen molekyyli voi toimia kytkimenä.

Vuonna 2000 Clintonin hallinto käynnisti massiivisen kansallisen nanoteknologiaa tukevan ohjelman. Tämän taloudellisen tuen avulla on perustettu kymmeniä nanoteknologian ohjelmia ja projekteja USA:n yliopistoihin. Bushin hallinto jatkaa edelleen samoilla linjoilla nanoteknologian kehityksen

tukemisessa.

Nanoteknologiaan panostetaan voimakkaasti myös Japanissa ja Euroopassa. Myös useimmissa Suomen yliopistoissa ja korkeakouluissa on aktiivisia nanoteknologian koulutus- ja tutkimushankkeita. Suurin osa kehitystyöstä tapahtuu yliopistoissa ympäri maailmaa, kaupallisia yrityksiä syntyy sitä mukaa, kun nanoteknologian sovellukset tulevat realistisemmiksi.

Nanoteknologian ympärille on rakentunut jo useita kansainvälisiä verkostoja, kuten EUSPEN (European Society for Precision Engineering and Nanotechnology), ECNM (European Consortium for NanoMaterials) ja USA:n pääjärjestö NNI (National Nanotechnology Initiative).

Vaativan tuotekehitystyön jälkeen nanokoneen valmistuskustannukset ovat yleensä alhaiset. Sarjatuotannossa hinta koostuu lähinnä raaka-aineen ja energian hinnasta. Nanolaitteiden valmistus olisi hyvin halpaa, mikäli tuote osaisi valmistaa kopioita itsestään (*self replicating system*). Tähän liittyy kuitenkin useita ongelmia. Vaikka hyvin yksinkertaisetkin elävät solut pystyvät jakautumaan, toistaiseksi ei ole pystytty valmistamaan yhtään laitetta, joka pystyisi samaan. Tutkimusten mukaan itseään kopioiva solu sisältää = 300 geeniä, mutta ei tiedetä miten tämän tiedon voisi muokata laitemaailmaan ja valmistaa itseään kopioivan koneen.

Toimivan nanokoneen ominaisuuksiin kuuluu *fail-safe* -suunnittelu, johon kuuluu myös kontrolloitu kahdentuminen. Itsestään lisääntyviä nanokoneita ei voida käyttää läheskään kaikissa sovelluksissa. Jotkut näkevät monistumisen riskit niin suureksi, että ovat val-



miita kieltämään kaiken monistamisen. Todennäköisesti lääketieteen alueella ei tulla hyväksymään sovelluksia jotka voisivat lisääntyä ihmisen elimistössä, ja monistamista valvotaan tiukoin viranomaistoimin kaikkialla maailmassa.

Nanoteknologiaa voidaan lähestyä kahdella eri kehitystekniikalla: Top-Down ja Bottom-Up. Top-Down-tekniikassa isosta kappaleesta poistetaan osia kunnes jäljelle jää toivottu rakenne. Menetelmää voidaan verrata kuvanveistoon, ja myös nykyiset miniatyrisointimenetelmät nojautuvat pitkälti Top-Down teknologiaan. Top-down tekniikalla ei kuitenkaan voida saavuttaa täydellistä molekyyliarakennetta, koska materiaalissa on aina kidevirheitä. Vaikka Top-Down menetelmä on nanoteknologian kannalta alkeellinen menetelmä, miniatyrisointi on ollut viime vuosina huimassa suosiossa ja sillä on saavutettu mullistavia tuloksia esimerkiksi elektroniikan alalla.

Bottom-Up tekniikassa sovellusta rakennetaan molekyyli kerrallaan. Tällöin rakenteen monimutkaistuu molekyyli tarkkuus säilyy koko ajan. Bottom-Up tekniikkaa ei vielä hallita tarpeeksi hyvin todellisten sovellusten rakentamiseksi.

Käytännön kehitystyötä tehdään tällä hetkellä uusien työkalujen rakentamiseksi (*enabling technologies*). Toimivien nanokoneiden rakentamisessa tarvitaan nykyistä tarkempia menetelmiä. Tämän tietotaidon lisäksi tarvitaan myös teoreettista nanomaailman tutkimusta, eli perustutkimusta fysiikan ja kemian lakien suomista mahdollisuuksista. Myös soveltavan teknologian, esimerkiksi lääketieteen, täytyy pystyä vastaamaan ongelmiin molekyyliatasolla.

## Nanoteknologian sovellusalueita

Nanoteknologiaa voidaan pitää aidosti poikkitieteellisenä tieteen kenttänä. Hyvin yksinkertaisetkin projektit vaativat eri alojen korkeaa tietotaitoa, kuten fysiikkaa, kemiaa, biologiaa ja teknistä osaamista. Nanoteknologian avulla pyritään ensivaiheessa toteuttamaan komponenttirakenteita, jotka toimintaperiaatteen osalta ovat lähellä tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevaa tekniikkaa.

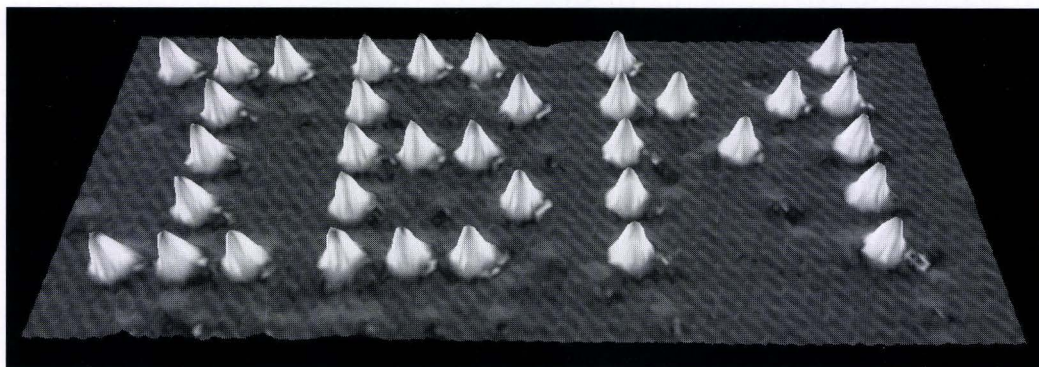
Nanoteknologialla on useita potentiaalisia sovelluskohteita lääketieteen alalla, sillä se mahdollistaa toimenpiteet solu- ja molekyyliatasolla. Diagnostiikan kehittyessä kasvaimet ja muut taudinaiheuttajat voidaan havaita entistä varhaisemmassa vaiheessa. Tällöin myös sairauksien parantamisen mahdollisuudet kasvavat. DNA-analytiikassa voidaan käyttää merkkiaineina puolijohde-nanokiteitä, jotka absorboivat fotoneja vain tietyllä aallonpituudella. Erikokoiset puolijohde-nanokiteet vaihtelevin konsentraatioin käytettynä tuottavat viivakoodispektrin, josta voidaan analysoida satoja komponentteja yhdestä näytteestä. Tämä mahdollistaa tehokkaan geneettisen materiaalin vertailun ja jopa korjauksen *in vivo*.

Lääkkeen annostelu voidaan kohdentaa tarkemmin, tällöin voidaan käyttää entistä vahvempia lääkkeitä samalla minimoiden sivuvaikutukset, koska koko elimistö ei ole kyllästetty lääkkeellä. Kehittyneet laukaisumekanismit mahdollistavat pulssittaisen ja tarpeenmukaisen lääkeannostelun (esim. diabetes). Aivo- ja hermostovaurioita voidaan parantaa luomalla keinotekoisia synapseja ja keinotekoisia tietoa varastoivia



soluja. Hampaiden puhdistuksessa voitaisiin käyttää nanorobotteja. Vastaavia nano-puhdistajia voitaisiin käyttää myös keuhkojen ja verisuonten puhdistuksessa. Näin saataisiin vähennettyä esim. tupakoinnin aiheuttamia keuhkovau-

tien saatavuus on usein rajallinen, ja allo- ja ksenograftien käyttöön liittyy elimistön hyljintäreaktion vaara sekä infektioriski (HIV ja BSE). Niinpä keinotekoisien materiaalien kehittämiseen riittää mielenkiintoa.



Tunnelointimikroskoopilla (UHV-STM) otettu kuva yksittäisistä ksenonatomista erilliskiteisellä nikkelpinnalla 4 K lämpötilassa. [1].

rioita ja verisuonten ahtaumia. Nanoteknologia tarjoaa mahdollisuuden kehittää yhä parempia proteeseja. Implanttimateriaalin kiinnittyminen ympäröivään kudokseen vaikuttaa oleellisesti proteesin pitkäaikaiseen pysyvyyteen. Timo Peltola on osoittanut väitöskirjassaan, että pinnan nanorakenteella on merkitystä luutumisen nopeuteen ja sitä kautta proteesin pysyvyyteen ja biologiseen yhteensopivuuteen. Aikanaan tiedemiehet toivovat pystyvänsä valmistamaan kudoksia, elimiä ja kokonaisia elinjärjestelmiä keinotekoisesti. Tällä hetkellä kudolvaurioiden korjaamiseen ja elinten korvaamiseen käytetään auto-, allo- ja ksenografteja sekä joitain keinotekoisia materiaaleja. Auto- ja allograf-

Vastaavasti nanoteknologialla on monia arvokkaita sovelluskohteita myös muilla tekniikan aloilla. Nanoelektronikassa pyritään paitsi pienentämään komponentteja ja nopeuttamaan niiden toimintaa myös yhdistämään erilaisia elektronisia, optisia ja mekaanisia komponentteja yhdelle mikrosirulle valmiiksi järjestelmiksi. Tätä teknologiaa kutsutaan mikrolaiteteknologiaksi ja sen puitteissa pyritään puolijohteiden, metallien ja lasien lisäksi yhdistämään mm. polymeerejä ja biomateriaaleja. Mikrolaiteteknologian taloudellinen merkitys on siinä, että sen puitteissa pyritään sulautettuihin järjestelmiin, joiden taloudellinen arvo voi olla huomattava myös pienillä tuotantovolyymeillä.

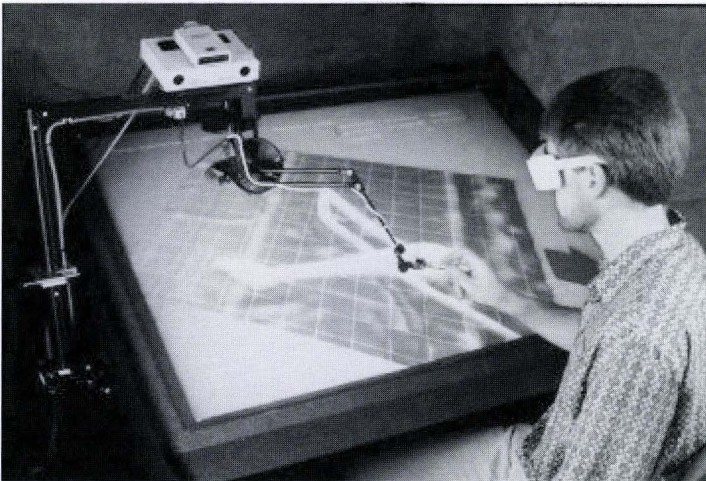


## Nanounelmia ja nanopainajaisia

Monesti on esitetty, että nanoteknologian avulla on mahdollista valmistaa tehokkaampia, nopeampia, vahvempia, pienempiä ja halvempia systeemejä. Valmistustekniikoiden kehittyessä tuotteiden valmistamisen toivotaan muodostuvan entistä joustavammaksi ja täsmällisemmäksi. Nanolääketieteellä voidaan haaveiden mukaan eliminoida hyvin monet nykyajan sairaudet, poistaa kipua ja diagnosoida elimistön tilaa huomattavasti nykyistä tarkemmin. Nanolaitteiden avulla voitaisiin mahdollisesti myös keinotekoisesti parantaa ihmisen fyysisiä ja henkisiä ominaisuuksia. Lisäämällä vereen keinotekoisia hapenkuljettajia, ihminen voisi sukeltaa tunnin yhteen menoon. Aivojen kapasiteettia voidaan kasvattaa sellaisten muistisirujen avulla, jotka sisältävät kirjaston verran informaatiota, ja lisäsynapseja rakentamalla voidaan ihmis-aivoillakin saavuttaa tietokoneen laskentateho.

Nanounelmilla on myös varjopuolensa. Sir William Perry kirjoitti jo vuonna 1640 pienen pienistä, näkymättömistä armeijoista. ”*Nor do I doubt if the most formidable armies ever here upon earth is a sort of soldiers who for their smallness are not visible.*” Perry tarkoitti mikrobeja, mutta ajatus voidaan yhtä hyvin liittää nanoteknologiaan.

Itseään monistavat nanorobotit ovat potentiaalisia uusia mahtiaseita. Tehokas teknologia luo valta-aseman ja valtaa on aina mahdollista käyttää väärin. Voidaankin kysyä, ovatko nanokoneet luomisen vai tuhoamisen välineitä? Kaikki ihmisen ominaisuuksiin kohdistuvat muutokset ovat jossain määrin arvaamattomia. Kukaan ei halua kontrolloimattomia muutoksia aivoihin, lihaksiin tai hengityselimistöön. Geneettisen perimän keinotekoinen parantaminen on erityisen riskialtista, koska muutokset perimässä siirtyvät sukupolvelta toiselle ja uhkaavat pahimmillaan koko ihmiskunnan olemassaoloa.



Pohjois-Carolinan yliopistossa kehitetty nanoManipulator-laitteisto. Kuva: Larry Ketchum. [2]



Nanoteknologia on kaikesta huolimatta uusi voimakkaasti kehittyvä tieteenala. Toivoa sopii, että kehittyvät nanotekniset sovellukset mahdollistavat uusia ratkaisevia edistysaskeleita useilla aloilla elektroniikasta lääketieteeseen. Nanoteknologia tarjoaa mahdollisuudet uuteen teolliseen vallankumoukseen edellyttäen kuitenkin laajaa yhteistyötä poikkitieteellisen unelman saavuttamiseksi. Nanotekniikan mahdollisuudet ulottuvat koneisiin ja laitteisiin, uusiin materiaaleihin ja lääketieteeseen. Kuinka pitkälle nanoteknologinen vallankumous voi jatkua, tai onko se edes mahdollista, sitä ei kukaan tiedä. 1980- ja 1990-luvulla kehitetyt atomivoima- ja tunnelointimikroskoopit tarjoavat nanoteknologian kehittämiseen työkalut, jonka kokonaisvaikutuksia voidaan vasta arvailla. Tällä hetkellä nanoteknologia on vielä enemmän unelmaa ja suuria odotuksia, kuin onnistuneesti toteutettuja hankkeita. On kuitenkin oletettavaa, että voimakas panostus nanoteknologian kehittämiseen tuottaa ennen pitkää arvokkaita käytännön sovelluksia.

## LÄHTEET:

- ALIVISATOS, A. P. Less is more in medicine, *Scientific American*, Sep 2001, p. 59-65.  
 BINNING, G., QUATE, C. F., GERBER, Ch. Atomic force microscope, *Physical Review Letters*, 56:930(1986).  
 DREXLER, K. Eric. Engines of Creation, The Coming Era of Nanotechnology. Anchor Books 1986.  
 BINNING, G., ROHRER, H., GERBER, Ch., WEIBEL, E. Surface studies by scanning tunneling microscopy, *Physical Review Letters*, 49:57(1982).  
 CHEN, X., DAVIES, M., ROBERTS, C., TENDLER, S., WILLIAMS, P., DAVIES, J., DAWKES, A., EDWARDS, J. Interpretation of tapping mode atomic force microscopy data using amplitude-phase-distance measurements, *Ultramicroscopy* 75:171 (1998).  
 CURTIS, A. & WILKINSON, C. Nanotechniques and approaches in

- biotechnology, *Materials Today* May/June 2001, p. 22-28.  
 DINARDO, N. Nanoscale characterization of surfaces and interfaces, *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*, Vol. 2B: Characterization of Materials, VCH 1994, p.118-137.  
 EIGLER, D. ja SCHWEIZER, E. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, *Nature*, 344:524 (1990).  
 HOLTZCLAW, Robinson, Odom, *General Chemistry*, D.C. Health and Company, USA 1991.  
 HONG, S. and MIRKIN, C. A Nanoplotter with Both Parallel and Serial Writing Capabilities, *Science*, 288:1808 (2000).  
 HOWLAND, R. and BENATAR, L. A practical guide to scanning probe microscopy, *Park Scientific Instruments* 1997, 73 p.  
 IVANISEVIC, A. and MIRKIN, C. Dip-Pen nanolithography on semiconductor surfaces, *Journal of American Chemical Society*, 123:7887(2001).  
 LEE, H. ja HO, W. Single-bond formation and characterization with a scanning tunneling microscope, *Science*, 286:1719(1999).  
 MAGERLE, R. Nanotomography, *Physical Review Letters*, 85(13):2749(2000).  
 MAGONOV, S. N. and WHANGBO, M.-H. Surface analysis with STM and AFM, VCH 1996, 323 p.  
 Nanoscope, III Atomic Force Microscope, Instruction manual, Version 2.2, Digital Instruments 1992, 69 p.  
 Nanotechnology Research Programme 1997-1999 Final Report, TEKES Technology Programme Report 17/2000, 107 p.  
 PAALANEN, M. Nanotieteessä pieni on kaunista, *Tieteessä tapahtuu*, 2:9(1998).  
 PELTOLA T. Nanoscale dimensions and in vitro calcium phosphate formation: Studies on Sol-Gel-Derived Materials and Bioactive Glass, University of Turku, 2000.  
 PELTONEN, J. ja Kuutti, L. Atomivoimamikroskopian uudet mahdollisuudet, *Kemia-Kemi*, 25(9-10):771(1998).  
 PINER, R., ZHU, J., XU, F., HONG, S., and MIRKIN, C. Dip-pen nanolithography, *Science* 283:661(1999).  
 SCHMITT, C., ELINGS, J., SERRY, M. Nanoindenting, scratching and wear testing using scanning probe microscopy, Application note, Digital Instruments 1997, 6 p.  
 STIX, G. Little big science, *Scientific American*, 9:26(2001).  
 WHITESIDES, G. and LOVE, J. The art of building small, *Scientific American*, (9):33(2001).  
 WICKRAMASINGHE, H. Progress in scanning probe microscopy, *Acta Materialia*, 48:347(2000).

## KUALÄHTEET:

- [1] <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html> (D.M. Eigler, E.K.Schweizer. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature* 344, 524-526 (1990).)  
 [2] <http://www.cs.unc.edu/Research/nano/index.html>

Kirjoittajat ovat Tampereen teknillisen korkeakoulun materiaaliopin laitoksen elektronimikroskopian laboratorion tutkijoita.