

# Nanotieteessä pieni on kaunista

Mikko Paalanen

**Kokeellisten tieteiden edistyminen perustuu taitoomme valmistaa entistä tarkempia ja usein myös entistä pienempiä mittalaitteita. Keski- ja uudenajan taitteessa tapahtunut tähtitieteen ja kellojen samanaikainen kehitys on tästä oiva esimerkki. Sana nano on kreikkaa ja tarkoittaa kääpiötä. Nanometri puolestaan on metrin miljardisosa. Nanotekniikassa pyrimme valmistamaan ja hyödyntämään erittäin pieniä, alle mikronin kokoisia mekaanisia rakenteita, sähköä johtavia komponentteja ja työkaluja. Nanotieteen vahvuus perustuu sen laajaan tieteidenvälisyyteen ja se ammentaa voimansa mm. fysiikasta, kemiasta, materiaalitieteistä ja biologiasta.**

Puhumme mielellämme erilaisista teknologioista, niiden tarpeellisuudesta ja joskus myös niiden haittavaikutuksista. Eräät niistä ovat nousseet hallitsevaan asemaan, megateknologioiksi, ja voimme todeta, että hyvinvointimme riippuu ratkaisevasti ainakin informaatio-, materiaali- ja bioteknologioista. Nanotekniikan tämän hetkinen valtava julkisuus ja suosio perustuu siihen, että se on kaikkien näiden kolmen megateknologian eturintamassa.

Nanotekniikka on informaatioteknologiassa ja varsinkin mikro-elektronikassa tapahtuneen valtavan kehityksen seuraava vaihe; nano-elektronikka on mikroelektronikan perillinen. Nanotekniikan sovellukset materiaali- ja bioteknologiassa ovat vielä varsin vähäiset, mutta kehitysnäkymät ovat suotuisat esimerkiksi uusien materiaalien ja tutkimusvälineiden valmistamisessa. Nanotekniikka saattaa tarjota jopa mahdollisuuden uusien materiaalien ja elektronikan komponenttien räätälöintiin erillisiä atomeja ja molekyylejä siirtämällä. Toisaalta biologia ja varsinkin elävä luonto tarjoaa nanotekniikoille pienten herkien antureiden ja mekaanisesti kestävien rakenteiden malleja ja valmistusmenetelmiä. Luontoaiti on esimerkiksi jo ratkaissut, miten valmistetaan suuria lukumääriä nanorakenteiden kopioita, ja tästä meidän pitäisi ottaa mallia.

## *Transistorista integroituihin piireihin*

Vuosi 1997 oli tieteen historiassa kolminkertainen merkivuosi, sillä täsmälleen sata vuotta aikaisemmin löydettiin elektroni, oli kulunut 50 vuotta ensimmäisen transistorin keksimisestä ja 10 vuotta ensimmäisen yhden elektronin siirtoon perustuvan transistorin valmistamisesta. Elektronin, ensimmäisen todellisen alkeishiukkasen olemassaolon todisti professori J. J. Thomson Cambridgen yliopistossa Englannissa vuonna 1897. Hän suoritti koheensa tyhjäksi pumpattussa lasiastiasa, josta kehittyi luontevasti elektroniikan käyttämä tyhjiö- eli elektroniputki. Puolihoiteisiin perustuvan transistorin puolestaan kehittivät Bardeen, Brattain ja Schockley Bellin Laboratoriossa Yhdysvalloissa 1947. Ensimmäinen transistorivahvistin valmistettiin germanium-puolihoiteen pinnalle. Piillä on germaniumiin verrattuna kestävämpi komponenttien pintaa suojeleva oksidikerros samoin kuin paremmat korkean lämpötilan ominaisuudet, ja se syrjäytti hyvin nopeasti germaniumin puolijohdetoellisuuden hallitsevana materiaalina. Piitransistorit avasivat tien puolijohdekomponenteille, jotka melko nopeasti syrjäyttivät vaikeasti käsiteltävät ja kalliit elektroniputket. Vaikka transistori keksittiin jo vuonna 1947, kesti aina vuoteen 1961 saakka, ennen kuin ensimmäiset integroidut piirit valmistettiin Texas Instruments -yhtiön tutkimuslaboratoriossa USA:ssa. Ensimmäisissä integroiduissa piireissä oli vain muutamia transistoreja ja nekin useita kymmeniä mikrometrejä läpimitaltaan. Viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana mikroelektronikka ja sen sovellutukset ovat kehittyneet valtavasti, kun transistorien integraatioiheyttä on pystytty lisäämään eksponentiaalisesti. Puhutaan nk. Mooren laista, jonka mukaan integroitujen piirien transistorien lukumäärä ja suorituskyky kaksinkertaistuvat noin 18 kk:ssa. Tämä on mahdollista, koska olemme oppineet valmistamaan entistä pienempiä transistoreja; tällä hetkellä mikroelektronikkateollisuus käyttää nk. 250 nm:n suunnittelustandardia. Nanoskaalan yläpää on siten jo valloitettu.

## *Mihin kasvu pysähtyy?*

Entä tästä eteenpäin? Voimme vain arvailla, kuinka kauan mikropiirien nopea kehitys voi jatkua. Useita kasvu hidastavia tekijöitä on jo näkyvissä ja näistä merkittävimmät ovat taloudelliset ja valmistustekniset ongelmat, monimutkaisten piirien ohjelmoitavuus ja luonnonlakien asettamat rajat. On varsin kallista perustaa uusi integroitujen piirien tuotantolinja, ja siihen pystyvät vain jo alalla hyvin sijoittuneet suurimmat yritykset. Suomen kaltaisen pienen maan ei mielestäni pidä lähteä kilpailemaan omalla komponenttutuotannollaan, sillä komponentit ovat vain elektroniikka-teollisuuden halpaa raaka-ainetta. Meidän on syytä keskittyä tämän raaka-aineen jalostamiseen mahdollisimman kilpailukykyisiksi tuotteiksi. Itseasiassa tuotantolinjan perustamiskustannukset kasvavat nopeasti integroitujen piirien vaikeusasteen myötä ja saattaa käydä niin, että yksinkertaisempien piirien myyntivoitolla ei enää pystytä kattamaan seuraavan sukupolven mikropiirin kehittämiskustannuksia. Alan gurun, professori Likharevin mukaan, tämä tapahtuu joskus vuoden 2010 jälkeen, kun 4 gigabiitin piirin laaja sarjatuoantto ei syystä tai toisesta onnistu. Luonnon lakien asettamia rajoja on helpompi tarkastella. Professori Likharevin mukaan SiMOSFET voi toimia vahvistimena aina noin 10 nm:n kokoon asti ja tämän rajan alapuolella on syytä siirtää yhden elektronin transistorin (SET) ja perinteellisen FET:n (Field Effect Transistor) muodostamiin hybridipiireihin. Ajallisesti tämäkin tapahtuu vasta vuoden 2010 jälkeen.

## *Yhden elektronin transistori*

Sähkövirta koostuu yksittäisten elektronien liikkeestä. Pienissä komponenteissa elektronivirran rakeisuus korostuu ja elektronien liikkuvuutta hidastavat sekä kvanttimekaaniset interferenssi-ilmiöt että muiden elektronien aiheuttama Coulombin työntövoima. Vaikka nämä ilmiöt tulevat yhä hallitseviksi pienimmässä, ja jopa haitallisiksi alle 10 nanometrin komponenteissa, voidaan niitä eräissä tapauksissa myös hyödyntää. Yhden elektronin transistorin toiminta perustuu elektronien väliseen Coulombin vuorovaikutukseen. Ensimmäisen SET:n valmistivat Dolan ja Fulton Bellin Laboratoriossa vuonna 1987. SET:ssä, aivan kuten normaalissa FET:ssä on kolme kontaktijohtoa ulkomaailmaan. Aivan samoin kuin FET:ssä, voidaan SET:n veräjän avulla ohjata lähteen ja nielun välistä virtaa. SET:lle ominaista on kahden tunneliliitoksen väliin muodostunut saareke. Tunneliliitokset ovat ohuita, elektroneja heikosti läpäiseviä oksidikerroksia ja elektronit tunneloituvat saarekkeelle yksitellen. Saareke on kooltaan niin pieni, että sen sähköstaattinen energia kasvaa huomattavasti, kun sille tunneloituu yksikin ylimääräinen elektroni. Tämä ylimääräinen elektroni estää varsin tehokkaasti myös seuraavan elektronin tunneloitumisen aiheuttaen Coulombin saarroksi kutsutun ilmiön: SET:n läpi ei kulje lainkaan virtaa. Kuitenkin virranjohtokyky voidaan palauttaa veräjän sähköistä potentiaalia muuttamalla. Veräjän avulla voidaan elektroneja ohjata jopa yksitellen lähteeltä nielulle ja tästä on johdettu komponentille yhden elektronin transistori -nimi. SET:it eivät ole vielä käytössä kaupallisissa elektroniikkapiireissä. Tämä johtuu siitä, että pystymme valmistamaan vain noin 50 nm:n suuruisia tunneliliitoksia, joissa Coulombin ilmiö on varsin heikko ja jotka toimivat vain matalissa kryogeenissa lämpötiloissa. Huoneenlämpötilassa toimivat SET:it, joiden keskussaareke on pienempi kuin 5 nm.

## *Nanomanipulointia ja molekyyli-elektronikkaa*

Tämän hetken tärkein kysymys on se, kuinka pystymme valmistamaan alle 5 nm:n kokoisia SET:ja. Erään mahdollisuuden tarjoaa atomivoimamikroskooppi, AFM. AFM:lla pintoja kuvataan liikuttamalla kevyesti terävää kärkeä, eräänlaista gramofonineulaa, sen yli. Pinnan muoto saadaan selville mittaamalla tarkasti kärjen pystysuuntainen liike pinnan eri kohdissa. Säätämällä AFM:n mittakärjen ja pinnan välistä voimaa voimme myös mekaanisesti täsmätyöstää pintaa tai pinnalle tehtyjä rakenteita. Esimerkiksi pieniä noin 45 nm:n kokoisia aerosolihiukkasia on siirretty AFM:n avulla niin, että ne muodostavat kirjaimet LTL (Low Temperature Laboratory). Molekyyliekimia tarjoaa toisenlaisen mahdollisuuden valmistaa sähköä johtavia komponentteja. Jo nyt on esimerkiksi onnistuttu syntetisoimaan kahden kultaelektrodin väliin bentseenirengasketjuja, jotka johtavat sähköä. Bentseenirenkaita on melko helppo liittää toisiinsa ja ketjun päät yhdistetään rikkiatomilla kultaan. Voidaan jo hyvällä syyllä puhua molekyyli-elektronikan synnystä. Tosin tällainen elektroniikka ei siedä kovin korkeita lämpötiloja käytettyjen kemiallisten yhdisteiden epästabiiliisuuden vuoksi.

## *Nanotutkimuksen rahoituksesta*

Nanotekniikka on noin 10 vuotta vanha ala ja se on tällä hetkellä suosittu sekä tutkijoiden että rahoittajien keskuudessa. Se on voimakkaassa kasvussa ja voidaan jopa puhua siitä, että sen harrastus yliopistoissa on muoti-ilmiönä lisääntymässä liiankin nopeasti. Tällä hetkellä pitäisi ehkä varoa sitä, ettei nanotieteessä synny yliopistoihin seuraavan 20 vuoden aikana samanlaista ylikapasiteettia kuin esimerkiksi ydinfysiikassa luotiin toisen maailmansodan jälkeen. Useissa maissa nanotekniikka on kuitenkin koettu niin tärkeäksi, että sille ohjataan kansallista erikoisrahoitusta. Nanotutkimus on mainittu tärkeänä alana esimerkiksi Euroopan Yhteisön puiteohjelmissa ja sitä rahoittaa myös USA:n puolustusvoimat DARPA-organisaation kautta. Vastaavasti Japanissa aloitettiin vuonna 1994 kansallinen nanotutkimusohjelma, jonka laajuus on noin 100 tutkijaa ja kesto 10 vuotta. Miten Suomessa pitäisi suhtautua nanotieteen rahoitukseen ja voimmeko ottaa oppia muiden maiden ohjelmista? Tutustuin TEKESin projektipäällikkö Oiva Knuutilan ja Suomen Akatemian Teknistieteellisen toimikunnan jäsenen professori Juhani Keinosen kanssa vuoden 1996 alussa Japanin nano-ohjelmaan. Tämä kansallinen ohjelma kattaa laajan alueen nanoelektronikasta ja materiaalitutkimuksesta aina nanorobotteihin saakka. Japanin mammuttimaisia tiedeohjelmia voidaan kuvata haulikkoammunnaksi. Useita hauleja tuhlataan varsinkin ohjelman alussa, mutta suurella todennäköisyydellä jossain vaiheessa yksi niistä osuu kymppiin. Ohjelmalla on myös ongelmia. Ensinnäkin se on tavattoman kallista, alussa rekrytointipohja on kapea ja ohjelman lopussa on alalla ylimääräistä tutkijakapasiteettia. Tämä on johtanut tutkijoiden epätarkoituksenmukaiseen kierrätykseen. Esimerkiksi 1994 alkanut nano-ohjelma rekrytoi suurimman osan tutkijoistaan juuri päättäneestä kansallisesta korkean lämpötilojen suprajohdeohjelmasta.

## *Kansallinen strategia ja nanotekniikan hyödyntäminen*

Suomessa on jo eräitä yrityksiä, jotka voivat hyötyä nanotekniikasta. Vaisala Oy on erikoistunut säähavaintoihin ja valmistaa mittauksiin käytettävät herkäät anturit itse. Hamlin Oy, joka oli aikaisemmin Vaisalan tytäryhtiö ja joka on nykyään amerikkalaisomistuksessa, valmistaa mikroelektronikan prosessien avulla piipohjaisia kiihtyvyyssantureita. Okmetic Oy on onnistunut valtaamaan jalansijan piikiekkomarkkinoilla ja eräät sen tuotteet soveltuvat mainiosti esimerkiksi mikromekaniikan komponenttien lähtömateriaaliksi. Suomen nanotekniikan tutkimusstrategiaksi ei Japanin haulikkomalli sovi, vaan meidän tulee keskittyä valikoivaan ja samalla tehokkaampaan tarkkuusammuntaan. Tämä edellyttää sitä, että sekä yliopistojen että rahoittajien pitäisi valita realistiset painopistealat, jotka nojaavat jossain määrin jo olemassaolevaan tutkimuspohjaan ja joilla on kasvavia sovellusmahdollisuuksia teollisuuden puolella. Uusilla aloilla tarvitaan myös entistä rohkeampaa tutkijoiden rekrytointia ulkomailta. Yliopistojen tehtävä on ensikädessä alan uusien tutkijoiden pikainen koulutus samalla kun perus- ja soveltavan tutkimuksen pohjaa laajennetaan. TEKES ja Suomen Akatemia aloittivat yhteisen noin 10 miljoonan markan laajuisen nanotekniikan rahoitusohjelmansa vuonna 1997. Siinä keskitytään alussa, jopa TEKESin tukemana, koulutukseen, ja kaupallisia sovelluksia etsitään maltillisesti ja realistisesti 510 vuoden päästä. Soveltavassa tutkimuksessa kansalliseksi painopistealaksi on mielletty erilaisten nanotekniikkaan pohjautuvien uusien anturien kehittäminen. Mikromekaniikka, jota ei vielä tueta, pitäisi liittää kansalliseen ohjelmaan mahdollisimman nopeasti. Tämä on sekä suomalaisen teollisuuden, VTT:n että yliopistojen kannalta oikea kansallinen strategia. Uusien anturien avulla on tarkoitus kehittää kilpailukykyisiä mittaussysteemejä ja hi-tech-teollisuustoimintaa. Kutsuisin tätä Nokian malliksi, sillä Nokiakin tekee tuotoksensa valmistamalla ja markkinoimalla systeemikonaisuuksia, kännyköitä, eikä yksittäisiä komponentteja.