



## A Novel Technology for Integrating Active and Passive Components

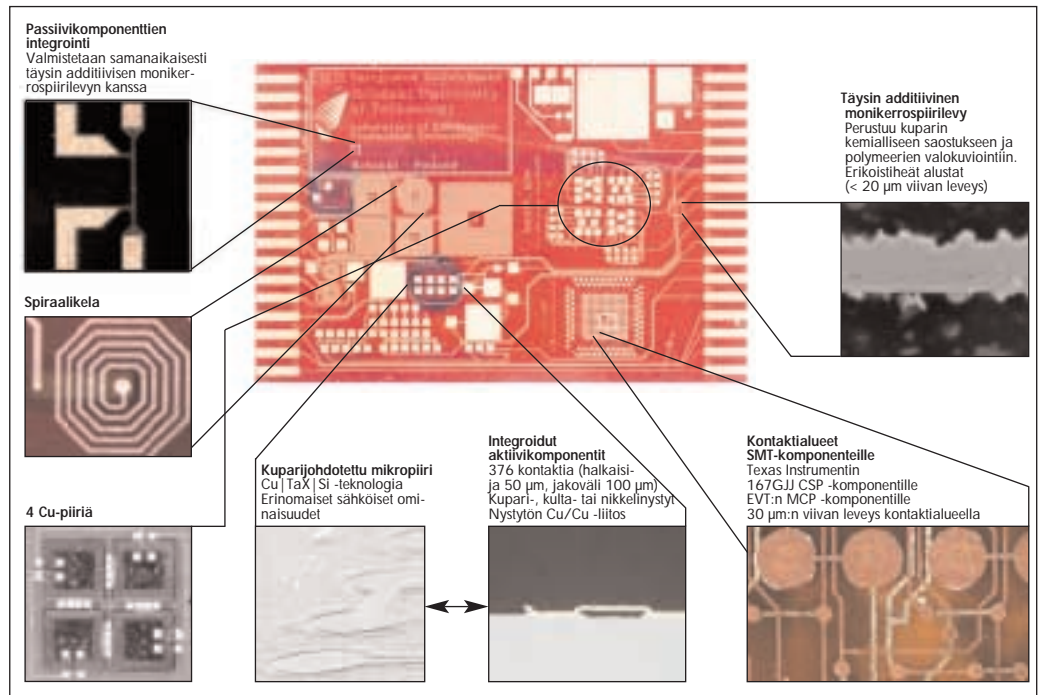
To meet the requirements of future reliable, multifunctional, high performance and environmental friendly electronic products, a solderless interconnection and packaging technique has been developed at Helsinki University of Technology. In this Integrated Module Board (IMB) technology active components are embedded in organic substrates using the Chip-in-Board (CIB) technique. This non-vacuum and solderless technology is based on photodefinable polymers and fully additive electroless plating processes. Conductive metals such as copper and nickel are chemically deposited onto photodefined wiring tracks and I/O pads of embedded active components. After the embedding, chip's interconnections and wiring are fabricated with a fully additive printed wiring board (PWB) process. The IMB technology enables short conductor line lengths, small line pitches (< 50 µm) and very high packaging density.

The IMB technology enables the integration of passive components, as well. The passives can be fabricated directly above (the active side of) the chip, which reduces the required line lengths, and therefore enhances the assembly's electrical performance. Since no solder is used in the IMB process the reliability and the electrical performance of high density modules are improved significantly. Being fully additive lead-free fabrication process it produces only a small amount of residuals with very low burden to the nature. The IMB technique offers an ideal active/passive component packaging solution.

The National Technology Agency of Finland (TEKES) and Finnish electronics industry are supporting financially the IMB research. In this ETX project the EPT laboratory is working together with VTT Electronics (Espoo). The contact person is Jorma Kivilahti (jorma.kivilahti@hut.fi).

# Integroitujen piirimoduulien suunnittelu ja valmistus

## Liitosalusta ja piiri ovat yhtä



KUVA: TKK EPT LABORATORY

Teknisessä korkeakoulussa kehitetyssä uudessa tekniikassa komponentit ovat osa piirilevyä. Moduuli on pienempi ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan parempi, jolloin nopeutta voidaan nostaa. Tavanomaisesta piirilevyn syövytyksestä ja juottamisesta poiketen IMB-moduuli kasvatetaan kerroksittain ja komponentit ladataan piirilevyn tekovaiheessa. Kontaktit syntyvät samalla kun kuparijohdotus kasvatetaan piirilevylle.

Elektronisten laitteiden toimintojen ja suorituskyvyn lisääntyessä mikropiirien viivanleveydet pienenevät ja kontaktitiheydet kasvavat, mistä johtuen myös komponenttien ja piirilevyn väliset liitokset pienenevät. Korkeammat taajuudet, lisääntyvät tehohäviöt ja kohinat synnyttävät perustavaa laatua olevia uusia valmistusteknisiä vaatimuksia.

Lankaliittämisen käyttö vaikeutuu, mutta muutokset koske-

vat myös pintaliitostekniikalla kokoonpantavia erikoistehkeitä komponenttilevyjä. Juotostilavuuksien pienentyessä liitokseen muodostuvien hauraiden metallienvälisen yhdisteiden suhteellinen osuus lisääntyy virrantiheyksien ja leikkausmyötymien kasvaessa. Tämän seurauksena liitosten mekaaninen kestävyys heikkenee, samalla kun pienet juotokset altistuvat enenevässä määrin elektromg-raatiolle.

Kuva 1. Aktiivi- ja passiivikomponentit integroidaan liitosalustaan IMB-tekniikalla.

Figure 1. Active and passive components are integrated into the substrate using the IMB technology.

Koska yhä pienemmät, kannettaviksi suunnitellut laitteet kokevat käyttörajoitusten lisäksi myös vaihtelevia käyttöympäristöjä, niiden toiminnan luotettavuudesta on muodostumassa entistäkin tärkeämpi tekijä. Tuoteluotettavuuden lisäksi elektroniikkateollisuuden uusien materiaalien ja valmistustekniikoiden on kyettävä vastaamaan alati tiukentuviin ympäristönsuojelullisiin vaatimuksiin.

Osa piiriä vai moduulia Uusien ratkaisujen löytäminen ja hyödyntäminen edellyttää tiiviimpää tuotteen suunnittelun ja valmistuksen nivovaa tekniikkaa.

Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa on kehitetty uudentyyppinen täysin juotteen valmistusmenetelmä, niin kutsuttu IMB-tekniikka, jossa ”piirilevyyn” haudatut paljaat, koteloidut mikropiirit kontaktoidaan sähköisesti kuparimetallilla piirimoduulin johdotuksen valmistuksen yhteydessä.

Kuten kuva 1 osoittaa, syövyttämättä eli täysin additiivisesti valmistettavaan monikerrosjohdotukseen voidaan integroida myös passiivikomponentteja kuten vastuksia, keloja ja kondensaattoreita. IMB-alustan valmistusprosessissa on aiemmin esitelty elektroniikan suunnittelua käsittelevässä Prosessorin erikoisnumerossa (1999).

Perinteisesti piirilevy on ollut vain johdinverkosto ja tukirakenne, johon toiminnalliset komponentit on liitetty. Kaikki toiminnot tapahtuvat piirilevyn pintaan liitetyissä komponenteissa. Integroitaessa aktiivi- ja passiivikomponentteja piirilevyn sisään se muuttuu ”eläväksi” osaksi suunnittelua. Kaikkia piirin toimintoja ei tarvitse integroida piille. Osa toiminnoista voidaan siirtää liitosalustaan, jolloin alusta itsessään on jo alkeellisesti toiminnallinen.

Piirimoduuliin voidaan liittää useita ”yhden toiminnon” mikropiirejä, jolloin piirien suunnittelu yksinkertaistuu ja mikropiiritason integraation tarve vähenee. Silti koko pysyy likimain ennallaan (Kuva 2). Suunnittelun integroinnilla mikropiirit voidaan valmistaa yksilöllisesti piirimoduulin ominaisuuksien ja lopputuotteen vaatimuksien mukaan – samalla kun alustan suunnittelussa huomioidaan mikropiirien ja lopputuotteen vaatimukset.

Mikropiirien, piirimoduulin ja kokoonpanon suunnittelu integroituu yhdeksi sovelluskohdattaiseksi prosessiksi. Samalla elektroniikan valmistus muuttuu aiempaa monimutkaisemmaksi eri tekniikoita käsittävää prosesseiksi, mikä edellyttää valmistuksen asiantuntijoilta yhä laaja-alaisempaa ja syvällisempää valmistuksen eri osaluokkien osaamista. Tuotteiden sähköisten toimintojen suunnittelu, valmistus, tarkastus ja testaus muodostavat osaamis- ja tehtäväkokonaisuuden, jonka hallinta edesauttaa uusien laadukkaiden tuotteiden nopeata markkinoille tuloa.

Tiiviitä passiivirakenteita

IMB-tekniikalla saavutetaan huomattavia etuja perinteiseen

valmistukseen verrattuna. Upotamalla mikropiiri piirimoduuliin vältetään muun muassa komponenttien jalkojen aiheuttama parasiittinen kapasitanssi ja induktanssi. Lisäksi aktiivikomponentin kontaktoinnissa ei käytetä lankaliittämistä, mikä parantaa huomattavasti kokoonpanon sähköisiä ominaisuuksia.

Johdintihyeksien kasvattaminen pienentää moduulin kokoa sekä vähentää tarvittavien signaalienergian lukumäärää nopeuttaen osaltaan tuotteen valmistusprosessia. Täysin additiivinen monikerrosjohdotus lisää suunnittelijan vapausasteita johdotuksen toteuttamisessa, esimerkiksi tärkeät johdotukset voidaan suojata erillisillä maatasoilla. Siirtolinjojen sijoittaminen tehotasojen väliin helpottaa esimerkiksi siirtolinjojen impedanssin hallintaa sekä vaimentaa linjassa muodostuvaa signaalikohinaa.

IMB-tekniikalla kuvioimalla tehdyt passiivikomponentit (kuva 4) mahdollistavat merkittäviä etuja esimerkiksi pintaliitostekniikalla liitettyihin komponentteihin verrattuna. Sovelluskohdattaisesti suunniteltavien passiivikomponenttien kuten vastusten, kelojen ja kondensaattorien suunnittelun lähtökohdaksi käytetään kontaktoitavia aktiivikomponentteja. Tällöin suunniteltavien passiivikomponenttien ei tarvitse rajoittua kaupallisesti saatavilla oleviin, ennalta määrättyihin erilliskomponentteihin.

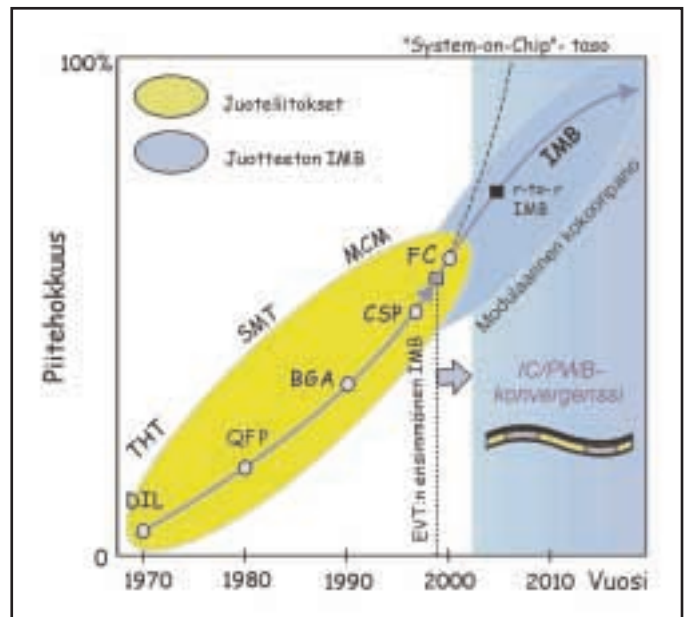
Kuvassa 3 on kaavamainen esitys IMB-tekniikka valmist-

tusta piirimoduulista ja HDI-alustaan liitetystä pintaliitoskomponentista. Tekniikka mahdollistaa esimerkiksi suodattimien ja vahvistimien sijoittamisen aktiivikomponentin välittömään läheisyyteen. Yhtäaikaan vaihtuva aktiivikomponenttien ohjainohjelma aiheuttaa digitaalisen systeemin tehon jakeluverkossa kohinaa, joka voidaan estää sijoittamalla erotuskondensaattori aktiivikomponentin ulostulon läheisyyteen.

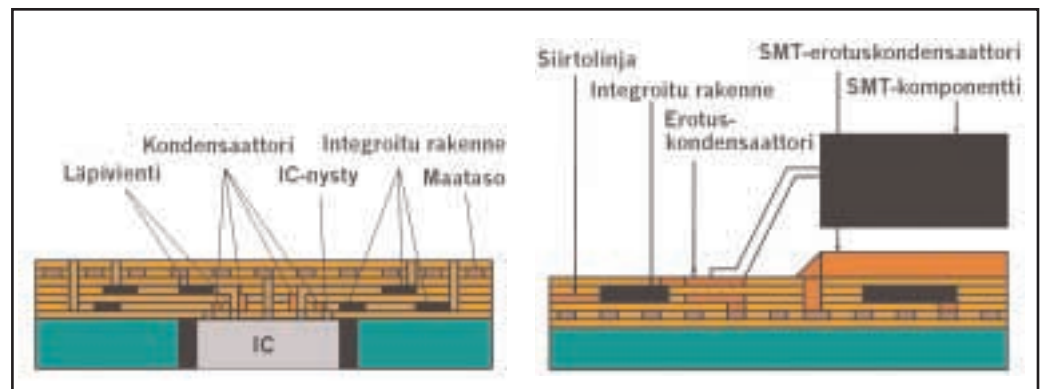
Kondensaattori voidaan integroida myös aktiivikomponentin johdotukseen, jolloin

saavutetaan huomattavia tilansäästöjä aktiivikomponentin läheisyydessä. Lisäksi ulostulon ja kondensaattorin välinen matka lyhenee merkittävästi. Erilliskomponenteilla toteutettaessa niiden suuri koko ja systeemiin aiheuttama parasiittisuus pienentää systeemin tehokkuutta ja toimii siten ”pullonkaulana” piirilevyn signaalin siirtonopeutta kasvatettaessa.

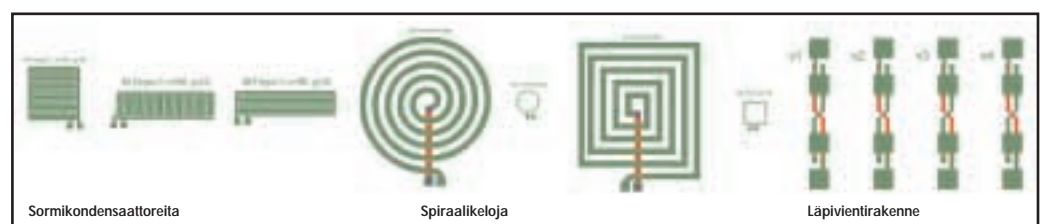
Kuvassa 4 on esitetty IMB-alustaan suunniteltuja passiivikomponentteja, joille on suoritettu taajuusriippuvuustestejä. Rakenteilla selvitetään muun



Kuva 2. Kokoonpanon tehokkuuden kehitys. Figure 2. The evolution of the packaging efficiency.



Kuva 3. IMB-moduuli ja HDI-alustaan liitetty pintaliitoskomponentti. Figure 3. IMB module and SMT component attached to the HDI substrate.



Kuva 4. IMB-alustaan integroituja kondensaattoreita, keloja ja lämpöeristysrakenteita. Figure 4. Capacitors, inductors and test vias integrated into the IMB module.

muassa integroitujen passiivikomponenttien resonanssitajuu- ja käyttäytymistä taajuuden funktiona. Rakenteet on toteutettu käyttämällä kahta signaalikerrosta, joita erottaa läpivientikerros.

Moduulin integroitujen passiivikomponenttien viivalevydet vaihtelevat 10–100 mikrometrin välillä. Lisäksi IMB-moduuli sisältää valmistusprosessin parantamiseen tähtäviä rakenteita, joissa pienimmät viivalevydet ovat 1,5 mikrometriä jakovälin ollessa 3 mikrometriä.

### Lämpömallinnus osana valmistusprosessia

Komponenttien voimakas lämmöntuotto kuin myös sen huomiotta jättäminen suunnitteluvaiheessa on eräs yleisiä laitteen vikaantumisen syitä. Siksi on tärkeää, että komponenttien synnyttämä lämpö ja sen johtuminen ja säteily komponenttien ympäristöön otetaan huomioon mallintamalla jo sähköisen suunnittelun alkuvaiheessa. Tällöin vältetään puutteellisesti suunnitellun rakenteen uudelleensuunnittelulta ja korjaukselta,

mikä lisää tuotteen kehittämisen ja tuotannollistamisen vaatimaa aikaa.

Erityisesti uusien tuotteiden kehityksessä mallintaminen on tehokas työkalu laitteen lämpösuunnittelun apuna. On kuitenkin muistettava, että kaikki mallintaminen vaatii rinnalleen huolellisesti suunnitellun ja toteutetun kokeellisen verifiointin. Niin itse mallit kuin niiden käyttämät kokeelliset parametritkin ovat puutteellisia ja vaativat kehittyäkseen ja tarkentuakseen kokeellista tutkimusta.

Kuvassa 5a on kaaviokuvana esitetty polymeerialustaan upotettu mikropiiri, jonka lämmöntuotto on mallinnettu CFD-tekniikalla (Computational Fluid Dynamics). Upotettu mikropiiri on kiinnitetty taustastaan lämpöä johtavalla liimalla lämpökaivoon.

Kuva 5b esittää kaksikulotteisen mallin mukaista lämpöjakaumaa kuvan rakenteessa, kun mikropiirin yläpinnan lämmöntuotto on neljä wattia. Mikropiirin ollessa upotettuna huonosti lämpöä johtavaan polymeeriin suurin osa muodostuvasta lämmöstä johtuu pois mikropiirin taka- ja etupinnan kautta. Tämän johdosta moduulin jäähdytys tulee suorittaa sen takapintaan kiinnitettyllä lämpökaivolla, sillä muutoin koko rakenteen lämpötila nousee korkeammaksi kuin mitä käytettävät materiaalit ja itse mikropiiri kestävät.

IMB-rakenteen mekaanisesta mallintamisesta Materiaaleihin ja komponentteihin kohdistuvan suoran lämpövaikutuksen lisäksi materiaalien rajapinta-alueisiin muodostuu huomattavia mekaanisia rasituksia niiden erilaisten lämpölaajenemiskertoimien ja kimmomodulien takia. Mekaanisen mallinnuksen avulla lämpötilan muutokset voidaan muuntaa venymiksi ja sitä kautta materiaalien ominaisuudet tuntien jännitysjakaumiksi ja liitosalueen todennäköiseksi käyttöiäksi.

Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa on selvitetty mallintamalla lämpövaikutuksen aiheuttamia rasituksia ja tutkittu, millaiset muutokset geometriassa tai materiaaliominaisuuksissa vähentäisivät niitä. Lämpöanalyysistä saatua lämpötilajakaumaa voidaan käyttää mekaanisen analyysin perustana. Laskelmissa on käytetty esimerkin vuoksi 100 asteen lämpötilan muutosta.

Kuten kuvasta 6 havaitaan, suurin lämpölaajenemisesta aiheutuva rasitus kohdistuu nystyyn ja johteen tyveen. Laskel-

mien mukaan jännitykset kuparissa eivät nouse juurikaan yli myötörajan, mikä viittaa rakenteen hyvään kestävyYTEEN.

Laskelmat tukevat ennakkoletusta, että jännitykset nystyssä ja johteessa vähenevät, kun polymeerin lämpölaajenemiskerroin lähestyy kuparin kerrointa. Tämä osoittautui merkitykselliseksi erityisesti, kun levyn vapaa taipuminen ja laajeneminen on estetty. Tilanne on tällainen esimerkiksi monikerrosrakenteessa, joka on jäykempi kuin yksittäinen levy, ja jossa välikerrosten polymeeri ei pääse vapaasti laajenemaan.

### Etälukukortti IMB-tekniikalla

IMB-tekniikan eräänä sovellutuksena Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa suunniteltiin ja valmistettiin koesarja etälukukortteja (kuva 7).

Moduuli sisältää kaksi kela, yhden kondensaattorin ja yhden aktiivikomponentin. Kondensaattorin dielektrisenä aineena käytettiin alustana toiminutta 300 mikrometrin paksuista FR4-levyä. Valmistuksen jälkeen tehdyissä mittauksissa kaksi kolmannelta kortista toimi moitteettomasti eli lukuetaisyys ylitti sille asetetun tavoiteetaisyuden. Etälukukorttiin integroitujen passiivikomponenttien sähköiset ominaisuudet vastasivat hyvin niille asetettuja tavoitearvoja.

Mallinnuksen mukaan rakenteen kestävyys 160 °C:n lämpötilan muutoksia hyvin, koska jännitykset jäivät suhteellisen pieniksi (60–80 MPa). Lämpöshokkitesti (kuva 8) tuki mallinnuksen tulosta, sillä kaikki testatut komponentit toimivat moitteettomasti myös testin jälkeen.

Testien perusteella IMB-tekniikalla valmistettujen etälukukorttien luotettavuutta ja sähköisiä ominaisuuksia voidaan pitää erinomaisina.

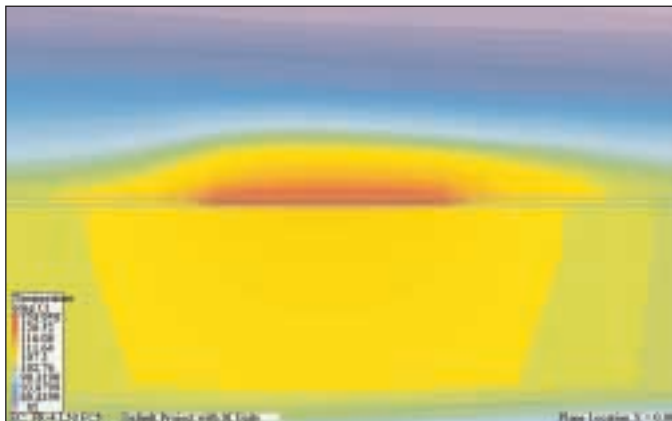
### Kolmiulotteinen kokoonpano

Elektronisten laitteiden koon pienentämiseksi ja sähköisten ominaisuuksien parantamiseksi mikropiirejä voidaan laotoa päällekkäin niin sanotuiksi 3D-komponenteiksi (MCM-V, Vertical). Kolmiulotteisella kokoonpanolla saavutetaan huomattavia, jopa 40–50-kertaisia tilan ja painon säästöjä perinteiseen kaksikulotteiseen kokoonpanoon verrattuna.

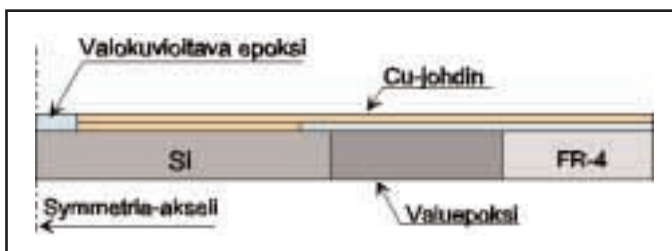
3D-rakenteen ansiosta ”kotilon” sähköisten kontaktien pituus lyhenee, jolloin loiskapanssi ja siten myös systeemin



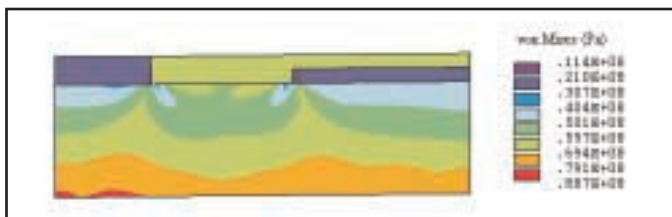
Kuva 5. (a) Lämpömallinnuksessa käytetyn rakenteen poikkileikkaus. Figure 5. (a) A schematic presentation of the structure used in the thermal modeling.



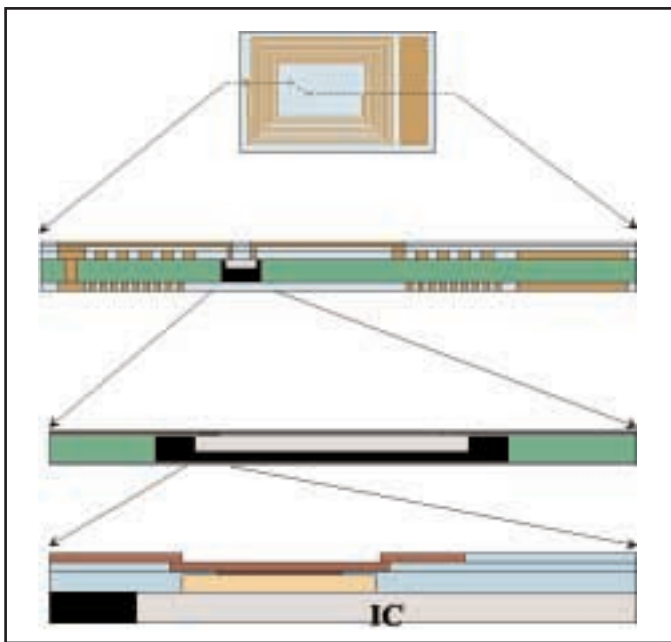
Kuva 5. (b) Lämpötilajakauma haudatun mikropiirin ympäristössä. Figure 5. (b) The temperature distribution in the vicinity of the chip.



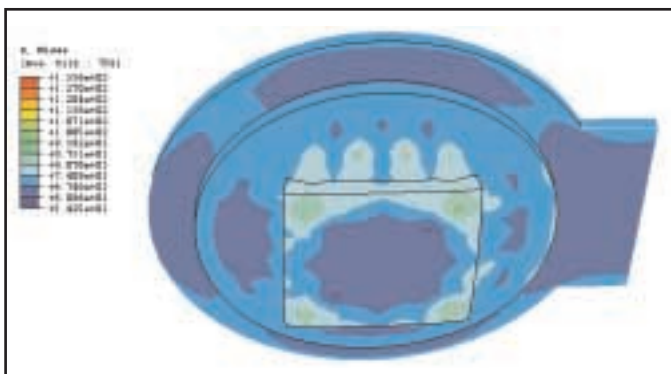
Kuva 6 (a) Jännitysmallinnuksessa käytetyn rakenteen poikkileikkaus. Figure 6. (a) A schematic presentation of the structure used in the mechanical modeling.



Kuva 6 (b) Jännitykset (von Mises, Pa) sähköisessä kontaktissa ja sen ympäristössä. Figure 6. (b) Stress distribution (von Mises, Pa) in the electrical contact.



Kuva 7. Kaavamainen esitys IMB-tekniikalla valmistetun etälukukortin rakenteesta.  
Figure 7. A schematic presentation of the cross section of a contactless smartcard fabricated with the IMB -technology.



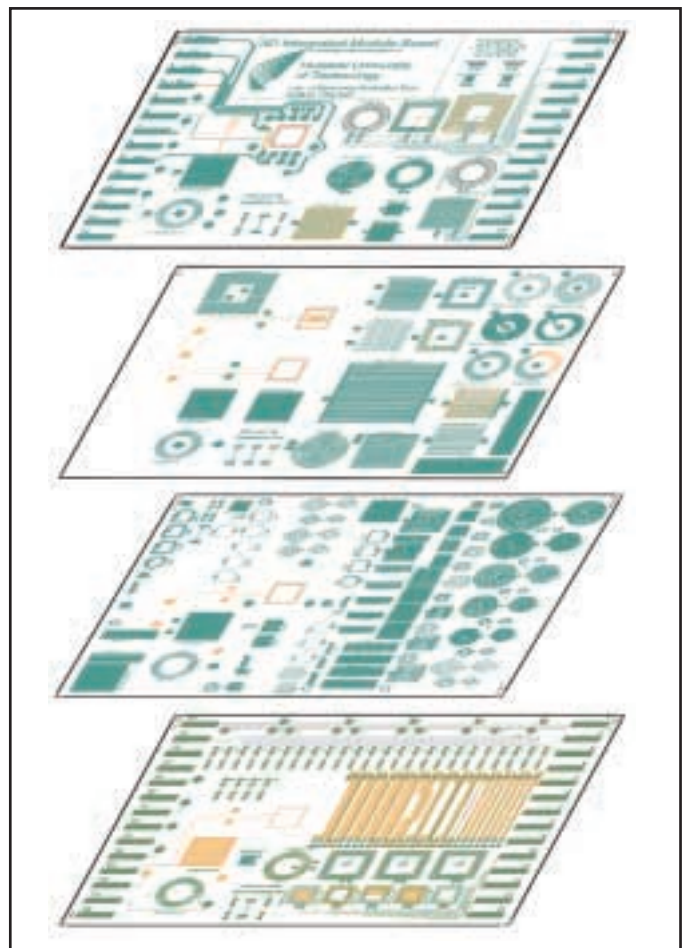
Kuva 8. Jännitysjaakama (von Mises) etälukukortin kuparijohtimen ja nikkeli-nystyn välisessä liitoksessa.  
Figure 8. (b) Stress distribution (von Mises) between the copper conductor and the nickel bump of the chip.

tehonkulutus laskevat huomattavasti. Lyhyiden sähköisten kytkentöjen ansiosta järjestelmän signaaliviive ja signaalikohina pienenevät. Tämä mahdollistaa korkeamman signaalitaajuuden käytön ilman systeemin tehon kulutuksen lisäystä.

3D-rakenteen heikkoutena on mikropiireissä muodostuvan lämmön siirto ympäristöön. Laddottaessa vähän lämpöä tuottavia muistipiirejä päällekkäin lämmönsiirtoon riittää yleensä alustan kautta tapahtuva lämmön johtuminen. Kontaktoitaessa enemmän lämpöä tuottavia komponentteja 3D-modulin jäähditys tulee toteuttaa esimerkiksi lämpöjohtimilla tai pakotetulla konvektiolla. Lisäksi moduli tulee suunnitella siten, että tehokomponentit ovat lähellä pintaa, jolloin ne ovat mahdollisimman helposti jäähdytettävissä.

Moduulin komponenttitehokkuuden parantamiseksi EVT-laboratoriossa on suunniteltu 3D-IMB, jossa yksittäiset IMB-alustat ladotaan päällekkäin ja kontaktoidaan sähköisesti. Kerrosten välinen sähköinen kontakti valmistetaan metalloimalla mekaanisesti porattu läpäreikä. Kuvassa 9 on esitetty 3D-IMB:n rakenne, joka sisältää viisi mikropiiriä neljässä eri kerroksessa. Mikropiirit on kontaktoitu kaikkiaan viidellä kemiallisesti metalloidulla läpäreillä. Mikropiirien lisäksi 3D-IMB sisältää rakenteita systeemin sähköisten ominaisuuksien määrittämiseksi.

**Moduulien volyyminvalmistus**  
Suurivolyymisempaa tuotantoa ajatellen EVT-laboratoriossa on rakenteilla IMB-valmistuslinja, jossa piirimoduulit prosessoit-



daan paneelittain. Paneelikoossa moduulien erämäärä voidaan haluttaessa nostaa muutamia tuhansiin kappaleisiin.

Suunniteltu IMB-valmistuslinja hyödyntää erikoisteiden liitosalustojen valmistukseen tarkoitettua semi-additiivista ja additiivista pinnoituslaitteistoa, pintaliitoskomponenttien ladonnassa jo käytössä olevaa tarkkuusladontakonetta (Philips ACM Micro) sekä dispenseriiä (Asymtek 725). Valmistettavasta sovelluksesta riippuen paneelien johdinkuvio valmistetaan joko substraktiivisella, semiaditiivisella tai additiivisella piirilevyn valmistustekniikalla. ●

Aiheesta enemmän:  
**Elektroniikan valmistustekniikan laboratorio:** [www.ept.hut.fi/](http://www.ept.hut.fi/)  
**Kujala, Kivilahti:** "Pienten liittosten tulevaisuus", Prossori/ES, marraskuu, 1999  
**Tuominen, Kivilahti:** "A Novel IMB Technology for Integrating Active and Passive Components", 4th International Conference on Adhesive Joining & Coating Technology in Electronics Manufacturing, June, 2000, Helsinki, pp. 269-273.  
**Kujala, Tuominen, Kivilahti:** "Solderless interconnection and packaging technique for active components", IEEE Electronic Components and Technology Conference, 49th ECTC, 1999, pp. 155-159.

Kuva 9. 3D-IMB, jossa on neljä päällekkäin laddottua IMB-alustaa.  
Figure 9. 3D-IMB, with four IMB modules are stacked together with adhesive.

## Taustat

**Kirjoittajat:** Professori Jorma Kivilahti on TKK:n Elektroniikan valmistustekniikan laboratorion ja Elektroniikan valmistuksen tutkijakoulun johtaja Sähkö ja tietoliikennetekniikan osastolla. DI Risto Tuominen toimii Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa "Sovelluskohtaisten integroitujen piirimoduulien valmistus" -hankkeen projektipäällikkönä. DI Dragos Burlacu sekä M.Sc. Hao Yu ovat jatko-opiskelijoita Elektroniikan valmistustekniikan tutkijakoulussa. Artikkelin tuottamiseen on myös osallistunut tekn.yo. Riitta Toivonen.

**Yhteystieto:**  
[jorma.kivilahti@hut.fi](mailto:jorma.kivilahti@hut.fi)

**Tutkimus:** Sovelluskohtaisten integroitujen piirimoduulien valmistus

**Yhteistyössä:** TKK/EVT laboratorio, VTT Elektroniikka, Nokia Mobile Phones, Aspocomp, Pico-pak, Elcoteq Network, Simage ja Okmetic.

**Teknologiaohjelma:** ETX