



3D packaging

Electronics development is driven by device and market needs. Manufacturing is moving from traditional manufacturing into a world of agile manufacturing. The ability to miniaturize functionality in devices has become an important enabler of new types of electronic products. Twenty-first century interconnect are face to face with fundamental, material, device, circuit and system limits.

Until now electronics development has been driven mainly by IC technology progress. New packaging solutions have to be push beyond the volume process of today, surface mount assembly. The trend is towards more and more complex and high-density packaging, such as systems-on-chip (SoC) and system-in-package (SiP).

Worldwide, 3D-packaging and flip-chip connection methods are under intensive research work in universities and companies. System-in-package is one main trend in construction of electronic systems. The driving force is integration without compromising individual chip technologies. Finally, stacked thin dice and flexible substrates are presented in our paper.

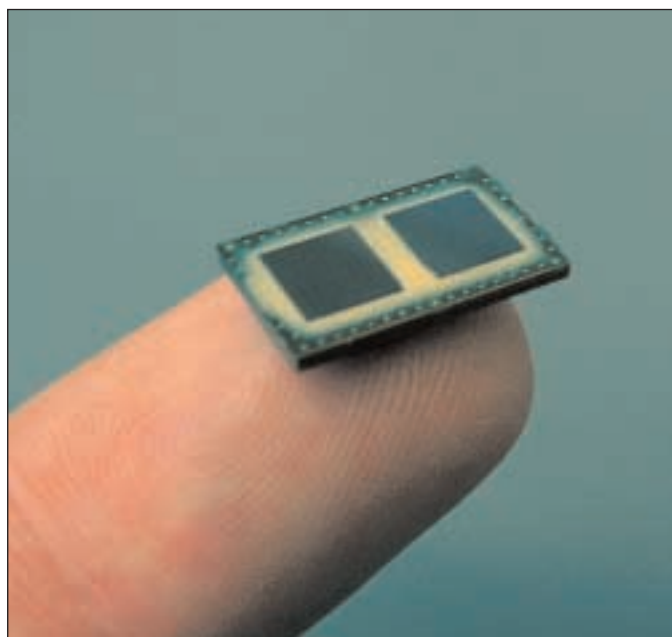
One main issue in heavily integrated system is thermal management. There are also many electrical issues with 3D-packaging. The INTO project is part of TEKES (the National Technology Agency in Finland) ELMO program. The contact person for the project is Jarmo Tanskanen (jarmo.tanskanen@tut.fi).

Integroituja piirejä on ollut standardipakkauksissa jo yli 25 vuotta. Pakkaustiheyden kasvaessa perinteiset pakkausmenetelmät ovat osoittautuneet riittämättömiksi. Yksi ratkaisu ongelmaan ovat erilaiset System-in-Package-rakenteet (SiP).

Haasteena on yhdistää eri teknologioilla valmistettuja komponentteja ja mikromekaanisia laitteita yhdeksi toimivaksi ko-

Elektroniikan pakkaaminen siirtyy kolmanteen ulottuvuuteen

Pinottu monisiruturakenne



Kuva: TTKK / ELE

Elektroniikan koon pientyminen on tapahtunut aina viime vuosiin asti lähinnä kaksiulotteisesti, piirilevyn tasossa. Kolmannen ulottuvuuden käyttöönotto elektroniikan miniatyyrisoinnissa tuo mukanaan uusia mahdollisuuksia kulutuselektroniikan toiminnallisuuden lisäämiseksi ja koon kutistamiseksi entisestään. Kolmiulotteinen pakkaaminen tuo mukanaan myös haasteita. 3D-pakkausten suunnittelu, testaus ja mallinnus ovat paljon uutta osaamista vaativia tehtäviä.

konaisuudeksi. SiP-moduuli on toiminnallinen kokonaisuus, jossa voi olla monia pii- ja piipohjaisia siruja, GaAs-siruja, diskreettejä ja integroituja passiivikomponentteja, suodattimia, kiteitä, antennejä, kontakteja ja eri alustoja.

Toiminnan eri osa-alueet voidaan suunnitella maantieteellisesti ja ajallisesti erillään ja huolellinen logistiikka huolehtii oikeasta ajoituksesta varsinaisen SiP-pakkauksen kokoamisessa. Eri toiminnot voidaan testata omissa valmistusvaiheissa etukäteen ja tarvittaessa suorittaa virittämistä ennen varsinaista

yhdistämistä toimivaksi kokonaisuudeksi. SiP-pakkauksessa voidaan yhdistää myös käyttäjäliittymiä, teholähteitä ja verkko-liittymiä. Ajavana voimana on laitteiden halpuus, tehokkuus ja mahdollisimman pieni koko.

SiP-teknikassa sirut liitetään suoraan erilaisiin tarkoitukseen mukaisiin alustoihin ilman erillisiä pakkauksia. Liittämiseen voidaan käyttää lankabondausta, TAB-liitosta tai flip chip-liitosta. Tekniikka mahdollistaa pienempien, kevyempien ja nopeampien järjestelmien valmistamisen eliminoimalla yksittäisistä pakkauksista johtuvia parasiittisia

komponentteja. Merkittävä etu on se, että SiP-teknikassa voidaan paketoitratkaisut helposti sovittaa eri asiakkaan tarpeiden mukaan. SiP-teknikassa pakkauksen koko riippuu siis vain sirujen koosta sekä I/O-signaalien määrästä.

SiP-rakenteiden yleistyminen markkinoilla ei ole ollut niin suurta kuin alunperin oletettiin. Tähän on ollut syynä muun muassa perinteisten yhden sirun pakkausten kehittyminen ja rakenteiden vaikea suunnittelu. Lisäksi ongelmana on lämmönsiirto rakenteista pois, sillä pakkauksen tihtyessä myös lämpeneminen on voimakkaampaa. Ratkaisuna ongelmaan voisi olla flip chip -liittämisen yleistyminen, jolloin lämmönsiirto voidaan hoitaa sirun takapuolelta.

SiP tulee vielä

Elektroniikan vaatimusten kasvaessa SiP-rakenteiden käyttö tulee todennäköisesti lisääntymään. Niiden etuja ovat suurempi pakkaustiheys, pieni koko, suurempi luotettavuus, pienemmät kokonaiskustannukset, vähäisempi tehonkulutus sekä muunneltavuus.

Kokonaisten sähköisen järjestelmän pakkaamisella yhteen pakkaukseen on etuja verrattuna SiP-menetelmän kilpailijana pidettyyn System on Chip -menetelmään (SoC), jossa sähköinen järjestelmä pyritään integroidaan yhdelle ainoalle piirille. SiPin merkittävä etu on, että pakkaukseen voidaan integroida useita eri puolijohdeteknologioilla toteutettuja piirejä, piirejä eri viivanleveyksin, digitaali- ja analogiapiirejä sekä eri tekniikoin toteutettuja passiivikomponentteja ja mikroelektromekaanisia komponentteja.

SiP on lisäksi huomattavasti edullisempi vaihtoehto integroida sähköinen kokonaisuus. SiP-pakkaukset ovat lisäksi kokoonpanoltaan helposti muutettavissa. SiP-moduuleista voidaan

tehdä erilaisia versioita vaihtamalla vain osan pakkauksen komponenteista ja liitosalustoista. Vastaava konfigurointi SoC-piireillä on vaikeaa ja kallista.

Ohuen 3D-pakkauksen etuja ja haasteita

Kolmiulotteisella pakkaamisella saavutetaan useita merkittäviä etuja verrattuna perinteiseen pakkaamiseen. Vertikaalisuunnan käyttö mahdollistaa erittäin korkean pakkaustiheyden eli pakkauksessa olevan aktiivisen puolijohteen pinta-ala voi olla huomattavasti suurempi kuin mitä itse pakkauksen liitosalustalta viemä pinta-ala on.

Kolmiulotteinen pakkaaminen mahdollistaa yhä enemmän ominaisuuksia sisältävien elektronikkalaitteiden kutistamisen kokoon, johon perinteisellä tavalla ei päästäisi. Pienemmästä koosta on hyötyä erityisesti mobiilelektronikassa, jossa laitteisiin halutaan enemmän toiminnallisuutta laitteiden koon kuitenkin kasvamatta, laitteiden kokoa haluttaisiin mieluummin kutistaa entisestään. Pienestä koosta seuraa myös pienemmät materiaalikustannukset, millä on merkitystä massatuotannossa. Pienentyneet materiaalmäärät ovat myös ympäristönäkökohtia ajatellen edullisia.

Kolmiulotteisella pakkaamisella saavutetaan etuja myös sähköisen toiminnan alueella. Yleensä 3D-pakkauksessa johdinpituudet lyhenevät, jolloin parasitiittisten komponenttien vaikutus voidaan minimoida. Järjestelmän tehonkulutus voi laskea huomattavasti loiskapasitanssien pienetessä. Pienet parasitiittiset induktanssit ja kapasitanssit luovat edellytyksiä korkeiden toimintataajuuksien käytölle ilman tehonkulutuksen lisäystä.

Yksi iso haaste 3D-pakkaamisessa on puolijohdepiireissä syntyvän lämmön siirtäminen ympäristöön. Kolmiulotteisessa pakkauksessa on pinottuna useita lämpöä tuottavia komponentteja päällekkäin, joten lämmönsiirtoon ja -siirtymiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Pakkaus rakenne

Tutkimuksessa on käytetty yksinkertaista pakkausrakennetta, joka koostuu kolmesta pinotusta kerroksesta ja kuudesta ohennetusta IC-piiristä, jokaisessa kerroksessa on siis kaksi ohennettua piiriä. Näin aikaansaatu rakenne on profiililtaan erittäin matala ja pakkauksen luotettavuus saadaan korkeaksi.

Pakkauksen korkeus saadaan pidettyä matalana, vaikka kerroksia olisikin useita. Ohut pii

on lisäksi taipuisaa, mikä pienentää liitosnystyihin kohdistuvia rasituksia ja lisää näin ollen liitosnystyjen luotettavuutta. Ohuista piireistä on hyötyä myös lämmön siirtymisen kannalta. Piirejä on ohennettu jopa 50 mikrometriin asti.

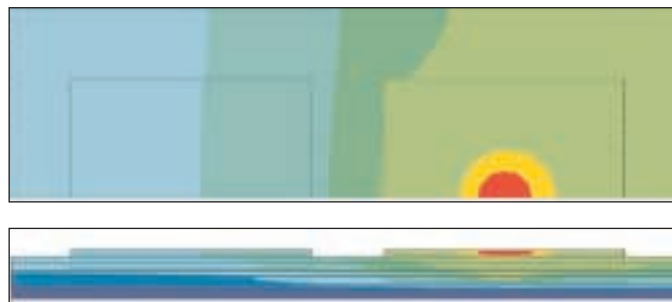
Ohennetut piirit on liitetty alustoille kääntöliitosmenetelmällä. Menetelmän etuna 3D-pakkauksessa on, että liitos ei vaadi enemmän alaa kuin piirien koon verran, myös vertikaalisuunnassa piiriin viemä tila on mahdollisimman pieni. Kääntöliitosmenetelmällä liitetyn piiriin sähköiset ominaisuudet ovat myös erittäin hyvät johtuen liitoksen lyhydestä, joten loiskinduktanssit jäävät pieniksi.

Piirien liittäminen voidaan tehdä joko juotteilla tai anisotrooppisesti johtavilla liimoilla. Liimaliitos soveltuu erityisen hyvin ohuiden ja taipuisien piirien liittämiseen, koska liimaliitos on profiililtaan juoteliihosta matalampi. Liimaliitos on myös joustavampi kuin juoteliihosta.

Pinotussa monisirupakkauksessa piirilevyt (alustat) ovat ohuita ja taipuisia, ja niiden johdotukset ovat tiheitä mahdollistaen monimutkaisen järjestelmän integroinnin pakkaukseen. Ohuilla alustoilla saavutettavia etuja ovat: valmiin pinotun pakkauksen matala profiili, sekä piirien juoteliihosten kasvanut luotettavuus.

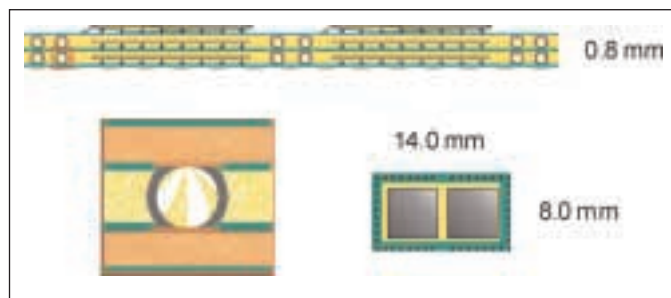
Alustoja, joille ohuet piirit ja passiivikomponentit on liitetty, voidaan pinota päällekkäin useita kerroksia. Kerrostenväliset kontaktit muodostetaan juotepalloilla, myös muita menetelmiä kerrostenvälisten kontaktien luomiseksi voidaan käyttää, kuten juotepastalla painettuja nystyjä ja juotepinnoitettuja polymeeripalloja.

Pinottuun pakkaukseen syntyneet ilmvälit täytetään lopuksi välitäytteellä (underfill) rakenteen luotettavuuden lisäämiseksi ja pakkauksen käsiteltävyyden helpottamiseksi.



Päältä ja sivulta kuvattu moduulin lämpötilajakauma, kun yksi siru tuottaa lämpöä.

The temperature distribution of the module when one chip generates heat.



Pinotun monisirupakkauksen rakenne.

Structure of stacked multichip package.

Materiaalien valinnat

Pakkauksen materiaalien valinnoilla on suuri merkitys pakkauksen luotettavuuteen ja sähköisiin ominaisuuksiin. Pakkauksen materiaalien tulee olla valittu siten että eri materiaalien lämpölaajenemiskerrointen väliset erot ovat mahdollisimman pienet.

Myös materiaalien sähköiset ominaisuudet tulee ottaa huomioon materiaalien valinnoissa. Materiaalikustannuksia ja pakkauksen valmistuskustannuksia massatuotannossa ei tule myöskään jättää huomiotta. Pinotussa monisirupakkauksessa materiaalivalinnoilla on pyrittävä korkeaan luotettavuuteen ja hyviin suurtaajuusominaisuuksiin, kustannustehokkuutta unohtamatta. Ympäristönäkökohtien huomiointi pakkauksen suunnittelussa ja valmistuksessa on kiristyvien ympäristönsuojelumääräysten takia välttämätöntä.

Polymeeripallot liitoksina

Juotepallojen asettelu on yleisesti käytettyä tekniikkaa BGA-pakkausten nystytyksessä. Kerrostenväliset kontaktit voidaan tehdä myös muuten, kuin tavallisilla juotepalloilla. Juotepinnoitetut polymeeripallot ovat mielenkiintoinen vaihtoehto pinottujen alustojen välisten kontaktien muodostamiseksi.

Palloissa on polymeeriydin joka on pinnoitettu ohuella kuparikerroksella, sekä juotekerroksella. Kuparikerroksen on

tarkoituksena toimia pääasiallisena virran kulkureitinä liitosnystyn läpi. Juotepinnoitettujen polymeeripallojen liittäminen voidaan tehdä samoin kuin tavallisten juotepallojen liittäminen.

Polymeeripallojen suurin etu pinotuissa rakenteissa on, että päällekkäisten kerrostojen välinen matka saadaan määrättyä tarkasti polymeeriytimen halkaisijan korkuiseksi ja kerroksia voidaan painaa päällekkäin pakkauksen valmistusvaiheessa liitosnystyjen romahtamatta.

Lämmön vaikutusta voidaan tutkia

On arvioitu, että noin 80 prosenttia elektronisten laitteiden vioista johtuu lämmöstä. Näin lämpötilasta ja sen vaihteluista muodostuu merkittävä haitta elektronisten laitteiden luotettavuudelle. Laitteiden lämpötila vaihtelee sisällä syntyvän lämmön sekä ulkolämpötilan muutosten seurauksena, mistä aiheutuu lämpölaajenemista.

Koska elektroniset laitteet muodostuvat useista eri osista, kuten komponenteista, liitoksista ja liitosalustoista, on niillä kaikilla erilaiset lämpö- ja mekaaniset ominaisuudet, kuten lämpölaajenemiskertoimet.

Koska laitteiden eri osat laajenevat eri tavoin, syntyy laitteeseen lämpötilan muuttuessa lämpöjännityksiä. Nämä jännitykset ovat erityisen vahingollisia komponenttien liitoksille ja tuovat laitteeseen luotettavuusongelmia. Siirryttäessä jalallisista komponenteista suoraliitoksiin lämpöjännityksistä muodostuu suurempi ongelma, koska liitoksen koko pienenee eikä se jouta muutosten mukana, kuten jalallisissa komponenteissa.

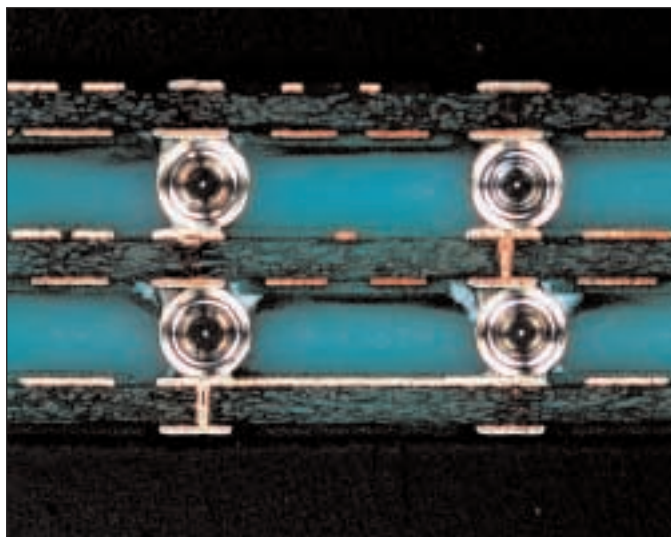
Toinen lämmöstä johtuva ongelma syntyy siitä, kun elektroniset laitteet pienenevät, mutta syntyvä teho pysyy samana. Tämä johtaa suurempaan tehotiheyteen, joka puolestaan synnyttää korkeampia lämpötiloja. Lämpötilat nopeuttavat laitteiden vikaantumista ja joissakin laitteissa aiheuttaa käytön epämukavuutta.

Komponenttien ja liitosten pienentyessä niiden tutkiminen luotettavuuden lisäämiseksi on tullut tärkeämmäksi, mutta samalla

myös vaikeammaksi. Kaikkia mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja ei ole mahdollista testata kokeellisesti, koska prototyyppien valmistus on hidasta ja kallista. Laskennallisen mallinnuksen avulla on mahdollista tutkia laitteiden toimintaa ja luotettavuutta ilman, että laitteita joudutaan rakentamaan. Tällöin voidaan nopeasti ja edullisesti tutkia erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja.

Laskennallisessa mallinnuksessa käytetään usein valmista elementtimenetelmä-ohjelmistoa (FEM), koska menetelmä soveltuu hyvinkin erilaisten ongelmien ratkaisemiseen. Mallinnus on erinomainen apuväline pyrittäessä optimoimaan rakennetta ja materiaaleja siten, että laitteen ominaisuudet olisivat mahdollisimman hyvät.

FEM-mallinnuksella voidaan esimerkiksi tutkia liitosalustan materiaalin ja sen paksuuden vaikutusta liitosten luotettavuuteen tai lämmön siirtymistä tehoa tuottavasta osasta ympäristöön. Lisäksi mallinnus soveltuu hyvin sellaisten rakenteiden ja ratkaisujen tutkimiseen, joita ei teknisistä syistä pystytä vielä valmistamaan. Tällöin on mahdollista tutkia tulevaisuuden vi-



Juotepinnoitetuilla polymeeripaloilla voidaan taata oikea kerrosten välinen korkeus.
Solder coated polymer balls can ensure the right stand-off height between stacked interposers.

sioita ja kartoittaa niiden toimivuutta käytännön tilanteissa.

Jotta mallinnettava ongelma voitaisiin ratkaista, joudutaan malliin usein tekemään yksinkertaistuksia rakenteen ja materiaalien suhteen. Täten malli ei vastaa täydellisesti oikeata laitetta, joten vaikka mallinnusta

olisikin käytetty apuna suunnittelussa, ei saatujen tulosten perusteella voida suoraan alkaa valmistamaan laitetta, vaan saadut tulokset pitää edelleen varmistaa mittauksin todellisesta laitteesta. Mallinnuksen avulla voidaan kuitenkin minimoida prototyyppien valmistusmäärää.

Jäähdytystä voidaan tehostaa komponenttien oikeanlaisella sijoittelulla. Pakkauksen jäähdytystä voidaan tehostaa myös erilaisilla lämpöjohtimilla. 3D-pakkauksen pitäminen ohuena osaltaan helpottaa lämmön siirtämistä ympäristöön.

Sähköinen suunnittelu

Rakenne ja käytetyt materiaalit määrittelevät millaisia virtoja ja jännitteitä voidaan moduulissa käyttää. 3D-moduulin mitat ovat hyvin pienet verrattuna nykyisiin massatuotannossa oleviin piirilevyihin. Johtimen leveydet ovat alle 100 mikrometriä ja johtimen paksuus muutama mikrometri, jolloin suuria jatkuvia virtoja ei johtimessa ilman migraatio-efektiiä voida kuljettaa. Pienet eristeetäisyydet rajoittavat jännitteenkestoa. Tosin maksimijännitetasoja rajoittavat jo IC-piirien salimat tasot.

3D-rakenteen voidaan ajatella olevan suuritiheyksinen monikerrospiirilevy (tai MCM), johon on haudattu piisiruja liittäntöineen. Kokoamisvaiheessa rakenteen luotettavuutta parannetaan välitäytteellä, joka imeytetään ja kovetetaan piirilevyjen väliin. Tällöin välitäytteen sähköiset ominaisuudet on myös otettava huomioon.

Piisirut on liitetty pallomaisilla juotenestyillä, jolloin välimatka sirusta piirilevyille on lyhyt (noin 80 mikrometriä). Juotenestyn

sarjainduktanssi (< 0,1nH) on erittäin pieni verrattuna lankabondattuun liitokseen. Nystyliitoksen sarjaresistanssi on myös erittäin pieni (noin 2 milliohmia). Tynnyrimäisten nystyjen välinen pinta-ala, jonka kautta voi tapahtua kapasitiivista kytkeytymistä, on niinkään pieni.

Jos piisirun liittäminen tehdään käyttäen an-isotrooppisesti johtavaa liimaa, ovat kultanystyt matalia ja suorakaiteen muotoisia. Piisiru ja piirilevy ovat silloin lähempänä (noin 20 mikrometriä) toisiaan. Nystyjen välinen pinta-ala on suorakaide ja kapasitiivinen kytkeytymisen on tutkittava. Liimassahan on johtavia partikkeleita, jotka potentiaalisesti vaikuttavat kultanystyjen väliseen ylikuulumiseen.

Piirilevyillä suunnitellut johdintyyppit ovat olleet mikroliuska ja koplanaarinen johdin. Näiden kahden erilaisen johdintyyppin tapauksessa ylikuulumista on simuloitu käyttäen 3D-kenttämallinnusta. Simulaattorina on käytetty CST Microwave Studio -simulaattoria. Tuloksia on laskettu myös HP ADS -ohjelmistolla vertailun vuoksi.

Ylikuulumisen pienentämiseksi pinottavissa rakenteissa johdintyypeistä mikroliuska on havaittu olevan parempi kuin koplanaarinen johdin. Lisäksi tavalliset suunnittelusäännöt kuten lyhyet johtimet ja niiden välimatkat mahdollisimman isoiksi ja mahdollisimman ehyiden maa- ja käyttöjännitetasojen käyttö ehkäisee eritasoissa olevien johtimien välillä tapahtuvaa ylikuulumista. ●

Aiheesta enemmän

Amkor Technology:

www.amkor.com

Tessera Technologies:

www.tessera.com

Tru-Si Technologies:

www.trusi.com

Taustat

Kirjoittajat: Jarmo Tanskanen, erikoistutkija, Jani Miettinen, tutkija, Jani Valtanen, tutkija, Tampereen teknillisen korkeakoulun Elektroniikan laitos, Professori Eero Ristolainen, projektin vastuullinen johtaja, TTKK Elektroniikka.
Yhteyshenkilö: jarmo.tanskanen@tut.fi

Tutkimus: INTO (Komponenttien integrointi ja liittäminen toimivaksi kokonaisuudeksi)

Yhteistyössä: TTKK, Aspocom, Elcoteq, KONE, Nokia Matkapuhelimet, Patria, Perlos ja Tellabs.

Teknologiaohjelma: ELMO