

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LAURI SILJANDER
PARYLEENIPINNOITTEEN KÄYTTÖ
KÄÄNTÖSIRULIITOSTEN VÄLITÄYTTEENÄ

Diplomityö

Tarkastajat:
tutkijatohtori Laura Frisk
tutkija DI Kati Kokko

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa
9. syyskuuta 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

SILJANDER, LAURI: Paryleenipinnoitteen käyttö kääntösiruliitosten välitäytteenä

Diplomityö, 45 sivua

Toukokuu 2010

Pääaine: Elektroniikan pakkaus- ja tuotantotekniikka

Tarkastajat: tutkijatohtori Laura Frisk, tutkija DI Kati Kokko

Avainsanat: paryleeni, suojapinnoitteet, välitäyte, kääntösiru, edulliset kääntösirusovellukset, liitosten korjattavuus, kääntösiruliitosten luotettavuus

Elektroniikan tuotantotekniikoista kääntösiruliitos on vanha, alun perin jo 1960-luvulla kehitetty teknologia, joka on kuitenkin vasta 2000-luvulla tullut yleisempään käyttöön elektroniikkatuottajien laitteistoinfrastruktuurin uusiutuessa pikkuhiljaa yhä pienempi-skaalaisten pintaliitoskomponenttien liittämiseksi. Kuitenkin kääntösiruliitos kamppailee perinteisessä elektroniikan pakkaustekniikassa yhä altavastaajana esimerkiksi lanka-liittämistä vastaan.

Edullisissa sovelluksissa kääntösirujen juoteliittäminen tehdään edullisille, tyypillisesti orgaanisille alustoille, jotka ovat myös termomekaanisilta ominaisuuksiltaan heikompia verrattuna esimerkiksi keraamialustoihin. Tällöin prosessissa tarvitaan erillisen välitäytteen lisääminen, mikä vähentää liitettävän sirun ja alustan lämpölaajenemiskertoimien välisistä eroavaisuuksista johtuvia jännityksiä. Välitäytteenä käytetään perinteisesti kapillaarisia epoksivälitäytteitä, jotka mahdollistavat hyvän luotettavuuden, sillä ne ovat lujia ja adhesiivisiä. Samalla kapillaaristen välitäytteiden hyvät ominaisuudet vaikeuttavat niillä parannettujen liitosten korjattavuutta.

Paryleenipinnoitteet ovat ominaisuuksiltaan ylivertaisia, ja jo ohuet kerrokset muodostavat erittäin tiiviin ja luottomattoman suojapinnoitteen elektroniikalle. Paryleenipinnoitteen soveltumista kääntösirujen välitäytteiksi ei ole juurikaan tutkittu ja aihetta käsitellään vain viitteellisesti liitosten korjattavuuden yhteydessä. Höyryvaporisaatioprosessi mahdollistaa paryleenin tunkeutumisen ahtaisiin väleihin, kuten sirun ja alustan väliin, ja toisaalta paryleeni on termomekaanisilta ominaisuuksiltaan sopiva välitäyttemateriaaliksi. Lisäksi paryleenin eduiksi voidaan laskea sen ympäristön vaikutuksilta suojaava vaikutus, mikä on ehto erityistä luotettavuutta vaativissa järjestelmissä ja vaikeissa ympäristöissä.

Työn tuloksena on tehty kirjallisuusselvitystä paryleenipinnoitteen soveltumisesta kääntösirujen välitäytteeksi sekä kokeellinen sarja, jonka perusteella on tutkittu tietyn paryleenipinnoitekerroksen tunkeutumista välitilaan sekä paryleenipinnoitettujen kääntösiruliitosten käyttäytymistä lämpösyklitestissä ja tehty tämän perusteella havaintoja ja ehdotuksia mahdollista jatkotutkimusta varten.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

SILJANDER, LAURI: The Usage of Parylene Coating as Flip-chip Underfill

Master of Science Thesis, 45 pages

May 2010

Major: Electronics packaging and production technologies

Examiners: Fellow Researcher Laura Frisk, Researcher M.Sc. (eng.) Kati Kokko

Keywords: parylene, conformal coatings, underfill, flip-chip, low-cost flip-chip applications, reworkability, flip-chip reliability

Flip-chip is a rather old technology based on IBM's C4-technology from the early 1960s. Although, since the early 2000s it has grown popularity among electronics production companies due to the renewal of the infrastructure for miniature scale SMT-components. In traditional electronics packaging flip-chip technology is still struggling in popularity with wire-bonding technology.

Low-cost solder-bumped flip-chip technologies have usually been assembled on inexpensive substrates, typically organic PCB. Expensive ceramics substrates are better in thermo-mechanical properties and more CTE-compatible with silicon chips which improve the joint reliability. For low-cost substrates, an underfill should be used to fill the gap between the substrate and the chip to upgrade the CTE-compatibility. Capillary epoxy resins are very adhesive and substantial to ensure better reliability. These good properties make the assemblies very hard and expensive to rework.

The quality and properties of pin-hole free parylene conformal coatings is very good from the outset of very thin coatings, and parylene is also very leak-proof and non-soluble conformal coating for microelectronics and biomedical applications. The applicability of the parylene coating as flip-chip underfill has not been studied much; it is only inessentially discussed among the reworkability of flip-chip joints. The vapor deposition process makes it possible for parylene to penetrate in the gap between the chip and the substrate, and on the other hand, parylene is thermo-mechanically suitable to be used as an underfill material. Of course, the protective properties of the parylene material are a benefit and prerequisite in challenging environments and high-reliability applications.

In this study, a literature survey has been done about applying parylene coating as flip-chip underfill. In the experimental section of this study some test series were assembled to ensure the penetration of parylene in the gap and to compare the reliability of the parylene underfill to regular epoxy resin and no-underfill assembly. Based on this study some suggestions were made for more in-depth future research.

ALKUSANAT

"It was a dark and stormy night."

- Edward Bulwer-Lytton, 1830.

Tämä diplomityö on tehty omakustanteisesti ja sivutoimisesti Tampereen teknillisen yliopiston Elektroniikan laitokselle lukuvuonna 2009-2010; pääosa kirjoitustyöstä tehtiin talvisimman talven 2010 aikana ja työ valmistui puiden lehtien puhjetessa.

Suuret kiitokset kuuluvat vanhemmilleni ja isovanhemmilleni kaikesta tuesta, mitä teiltä olen opiskeluaikanani saanut. Kiitokset myös TTY:n Elektroniikan laitokselle tutkija-tohtori Laura Friskille ja DI Kati Kokolle opastuksesta ja neuvoista.

Eriytinen kiitos avovaimolleni Lauralle, ilman Sinun tukeasi tämä olisi ollut mahdoton tehtävä.

Tampereella 17. toukokuuta 2010

Lauri Siljander
Tammelan puistokatu 14-16 A 11
33100 Tampere
lauri.siljander@iki.fi
Puh. 040-7498169

SISÄLLYS

1.	Johdanto	1
2.	Kääntösirutekniikka	3
2.1.	Kääntösirujen liimaliittäminen.....	5
2.2.	Kääntösirujen juoteliittäminen.....	7
2.2.1.	Juoteliitosprosessi	9
2.2.2.	Liitosnystyt ja -materiaalit.....	11
2.3.	Kääntösiruliitosten luotettavuus.....	13
2.4.	Kääntösiruliitosten vikaantumismekanismit	16
3.	Kapillaarinen välitäyte	18
3.1.	Ominaisuuksia ja vaatimuksia kapillaariselle välitäytteelle	19
3.2.	Prosessit kapillaarisen välitäyteen käytössä.....	21
3.3.	Vaihtoehdot kapillaariselle välitäytteelle.....	22
4.	Suojapinnoitteet elektroniikassa.....	24
4.1.	Suojapinnoitteen tarkoitus.....	24
4.1.1.	Suojaaminen korroosiolta	25
4.1.2.	Sähköinen eristäminen.....	26
4.1.3.	Suojapinnoitteen muut tehtävät	26
4.2.	Suojapinnoitteen vaatimukset	27
4.3.	Sopivan suojapinnoitteen valinta	29
4.4.	Paryleeni C ja höyryvaporisaatioprosessi	30
4.5.	Paryleenipinnoite välitäyteenä.....	32
4.6.	Paryleeni-välitäyteen edut ja haitat epoksiin verrattuna	33
5.	Kokeellinen osuus	35
5.1.	Testisiru ja alusta	35
5.2.	Liitosprosessi ja välitäyttäminen.....	36
5.3.	Lämpösyklitestin tulokset	38
5.4.	Paryleenin tunkeutuminen kääntösirun alle	41
6.	Johtopäätökset ja pohdinta	44
	Lähteet.....	46

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ACA	Anisotropically Conductive Adhesive, anisotrooppisesti johtava liima
Ag	Hopea
ASTM	American Society of Testing and Materials, standardeja luova elin
BGA	Ball Grid Array, kotelo, jossa liitännät on muodostettu juotospallonastoista, jotka sijaitsevat matriisimaisesti kotelon pohjassa
CFR	Constant Failure Rate, vikaantumisten vakioituminen käyttökauden aikana
CSP	Chip-Scale Package, JEDEC:n standardin mukaisesti enintään 20% sirua suurempi pakkaus
CTE	Coefficient of Thermal Expansion, lämpölaajenemiskerroin
CVD	Chemical Vapor Deposition, tyhjiöhöyrystysmenetelmä
DFR	Design for Reliability, luotettavuuden huomioiminen suunnitteluvaiheessa
ELF	Early-life Failure, varhaisajan vikaantuminen
ECA	Electrically Conductive Adhesive, sähköä johtava liima
FEM	Finite Element Method, elementtimallinnuksen menetelmä
flip-chip	Kääntösiru
FR-4	Orgaaninen piirilevymateriaali, jonka tulenkestävyysluokka on 4
ICA	Isotropically Conductive Adhesive, isotrooppisesti johtava liima
IPC	Association Connecting Electronics Industries, eräiden elektroniikkateollisuuden yritysten vuonna 1957 perustama yhdistys, joka pyrkii ohjaamaan kehittyvien valmistustekniikoiden kehitystä pysymään laatuvaatimusten mukaisina
JEDEC	Joint Electron Devices Engineering Council, vuonna 1958 perustettu maailmanlaajuinen puolijohdeteollisuudelle standardeja luova elin
MCM	Multi-Chip Module eli monisirumoduli

MIL-STD	Military Standard, USA:n armeijan standardiperhe
NCA	Non Conductive Adhesive, sähköisesti johtamaton liima.
pad	Juotospiste, liitäntä
parylene C	Kaupallinen nimike eräälle polymeeripinnoitemateriaalille
Pb	Lyijy
Sn	Tina
T_g	Lasittumis- eli lasisiirtymälämpötila
TAB	Tape Automated Bonding, kantonauhatekniikka
Torr	Paineen yksikkö, torri
TSM	Top Surface Metallurgy, alustan kontaktimetallointi
UBM	Under Bump Metallization, nystynalusmetallointi
underfill	Välitäyte, sirun ja alustan väliin sijoitettava materiaali
wire bonding	Lankaliitostekniikka
WOF	Wearout Failure, loppuun kulumisesta johtuva vikaantuminen
Young's modulus	Youngin moduli eli kimmokerroin

1. JOHDANTO

Lähtökohtana kääntösirutekniikalle on toiminut pyrkimys päästä kohti yhä pienempiä toiminnallisia rakenteita elektroniikan pakkaustekniikassa. Puolijohdepiirit valmistetaan piikiekoille, joista ne irrotetaan siruina joko pakattavaksi tai suoraan alustalle liitettäväksi. Pakkausteknologioiden kehittyessä päästään entistä lähemmäs kiekkotason pakkausta, joka on tällä hetkellä optimaalisin pakkaustaso. [14][27]

Integroitujen puolijohdepiirien pakkauksen tehtävänä on kohtuullisilla kustannuksilla sekä mahdollistaa piirin liittäminen että tuoda ja viedä sille tarvittavat signaalit. Lisäksi sen tehtävänä on piirillä syntyvän lämmön johtaminen ulommille pakkaustasoille ja mekaanisen tuen ja suojan tarjoaminen herkästi rikkoutuvalle piirille. Pakkauksessa käytettävät tekniikat ja materiaalit ovat useimmiten kompromissi jonkin edellä mainitun parametrin kustannuksella. Lisäksi on havaittu, että pakkaustekniikalla ja sen kehittymisellä on transistoritiheyden lisääntymisen lisäksi hyvin suuri merkitys pakattujen puolijohdepiirien suorituskyvyn kehittymiseen. [14][27]

Pakkaustekniikan ensimmäisellä tasolla puolijohdesiru liitetään sille suunniteltuun pakkaukseen, joka on materiaaliltaan useimmiten keraamia tai polymeeria. Liitos voidaan tehdä esimerkiksi lankaliitoksena, kantonauha- tai kääntösirutekniikan avulla. Pakkaustekniikan toisella tasolla pakkaus voidaan jälleen liittää rajapinnastaan käytettävään alustaan komponenttina. Kääntösirutekniikka mahdollistaa myös sirun liittämisen suoraan piirilevyille eli hyppäämisen yhden pakkaustason yli, mikä osaltaan parantaa elektroniikan integraatioastetta ja mahdollistaa paremman suorituskyvyn. Kun integraatiota viedään askel pidemmälle, puhutaan *MCM*- eli monisirumoduleihin perustuvasta tekniikasta. [27]

Korkean suoritusason puolijohdepiirien viiveistä yli puolet johtuu pakkaustekniikan parasiittisista komponenteista käytettäessä lankaliitostekniikkaa [27]. Kääntösirutekniikan käyttämiselle pakkaustekniikassa voidaan nimetä useampia etuja yleisesti käytettyyn lankaliitostekniikkaan verrattuna, jotka näkyvät suoraan valmiin komponentin elektronisen suorituskyvyn parantumisenä. Kääntösirutekniikka vaatii kuitenkin erilaisien ongelmien käsittelyä, joissa materiaalien ominaisuuksien tunteminen korostuu.

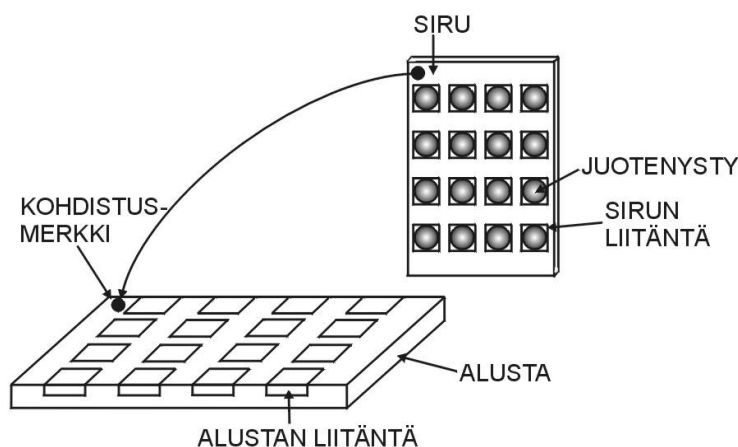
Teoriaosuudessa keskitytään juotenystyjen avulla liitettävien kääntösirujen välitäyttemateriaalien luotettavuusvaikutukseen, ja tarkkaa aihetta sivuavia tapoja ja tekniikoita käsitellään työssä pintapuolisemmin. Luotettavuutta parannetaan useimmiten kapsuloimalla

siiru tai täyttämällä sirun ja alustan välitila välitäytteellä käyttäen erilaisia polymeeriepoksia tai -hartseja. Paryleenilla on materiaalina välitäytteelle sopivia ominaisuuksia ja höyryvaporisaatioprosessissa asennettavana se tunkeutuu mikrometritason rakoihin, joten teoriassa myös sitä voidaan käyttää kääntösirujen välitäytteenä. Paryleenivälitäytteen käyttö olisi perusteltua erityisesti kalliiden sirujen uudelleentyöstössä, sillä epoksi- välitäytettä käytettäessä sirun irrottaminen on osoittautunut suhteellisen vaikeaksi ja monimutkaiseksi prosessiksi [31].

Kokeellinen osuus keskittyy kolmen erilaisen koesarjan käsittelyyn. Käytetty siiru ja alusta ovat Elektroniikan laitoksella testikäyttöä varten suunniteltuja. Sarjat lämpösykli-testattiin, paryleenin tunkeutumista välitilaan tutkittiin mikroskopian avulla ja tulokset analysoitiin. Työssä ei oteta kantaa paryleenipinnoitustekniikan soveltumisesta suurivo-lyymiseen tuotantoon tai tekniikan hintaan vaan tulosten perusteella on tarkoitus määri- tellä, kannattaako tutkimusta paryleenipinnoitteen käytöstä kääntösiruliitosten välitäyt- teenä jatkaa ja millaiset ovat mahdollisen jatkotutkimuksen lähtökohdat.

2. KÄÄNTÖSIRUTEKNIikka

Kääntösirutekniikalla tarkoitetaan paljaan puolijohdesirun liittämistä alustalle aktiivinen puoli alaspäin sirun liitännöille rakennettuja nystyjä apuna käyttäen, kuten kuvassa 2.1 on havainnollistettu. Teknologian tässä muodossaan esitteli ensimmäisenä IBM 1960-luvulla nimittäen tätä C4-tekniologiaksi (*Controlled-Collapse Chip Collection*). Sähköinen ja mekaaninen liitos kääntösirun ja alustan rajapinnalla voidaan muodostaa joko metallurgisesti juotteen avulla tai adhesiivisesti. Liimaliitoksissa käytetään johtamatonta liimaa tai johtavaa isotrooppista ja anisotrooppista liimaa. [14, 35]



Kuva 2.1. Kääntösiruliitoksen periaate.

Kääntösirutekniikan käyttö on vuosituhannen vaihteesta alkaen yleistynyt kiihtyvään tahtiin ja kilpailee pakkaus- ja liitostekniikassa yleisimmän lankaliitostekniikan sekä pitkälle automatisoidun kantonauhatekniikan kanssa. Lankaliitostekniikkaan verrattuna nystyihin perustuvilla liitostekniikoilla on huomattavia etuja. Näitä ovat esimerkiksi mahdollisuus ohuempaan viivanleveyteen ja korkeampaan I/O-liitännöiden tiheyteen, liitetyn sirun viemä pieni tilavuus ja sitä kautta pienempi pakkaus, matala kohina ja erityisen hyvät sähköiset ominaisuudet. Liitos pystytään muodostamaan käyttäen mahdollisimman pientä välimatkaa, jolloin rajapinnan parasiittiset komponentit ovat äärimmäisen pieniä verrattuna lankaliitostekniikan suhteellisen pitkiin johtimiin, mikä muun muassa parantaa suurtaajuusominaisuuksia. Lisäksi lankaliitoskytkentä on verraten hidas, sillä liitokset tehdään yksi kerrallaan ”sarjatuotantona”. [14]

Kääntösirutekniikan erityisinä vahvuuksina voidaan pitää suurta pakkaustehokkuutta ja tekniikan samankaltaisuutta sekä mahdollista integrointia osaksi perinteiseen pintaliitos-

tekniikkaan perustuvia tuotantolinjoja suhteellisen pienin kustannuksin. Pintaliitostekniikassa ja edullisia sovelluksia vaativissa siruliitoksissa alustana käytetään useimmiten tavallisia orgaanisia alustoja, kuten polyeteenialustoja tai FR-4-piirilevyä, jotka ovat fysikaalisilta ominaisuuksiltaan esimerkiksi keraamialustoja huomattavasti heikompia. Esimerkiksi alustan, sirun ja liitosnystyjen lämpölaajenemiskertoimien eroista johtuvien mekaanisten rasituksien kompensoinniksi on käytettävä välitäytettä pitkäaikaisluotettavuuden parantamiseksi, mikä edellyttää välitäytteen annostelun ja kovetuksen lisäämistä tuotantoprosessiin. Välitäytettä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3. [14, 38]

Juotenystyjen resistanssi on tyypillisesti mikro-ohmien luokkaa. Nystyjen resistanssiin vaikuttaa erityisesti nystymateriaalin tai -seoksen johtavuus ja kontaktiresistanssi sirun kanssa. Lisäksi resistanssiin vaikuttaa nystyn fyysiset ominaisuudet, kuten korkeus ja halkaisija sekä viivanleveys ja välitäytteen materiaali [14]. Suurtaajuusominaisuuksien kannalta hallitsevia parametreja ovat nystyn kapasitanssi ja induktanssi, joissa voi olla noin dekadin ero nystyjen hyväksi vastaavien lankaliitosten parasiittisiin komponentteihin verrattuna [35].

Pakkaustekniikassa lankaliitostekniikka on hallitseva tekniikka puolijohdesirujen liittämiseksi alustalleen pienemmällä, noin alle 700 kappaleen I/O-liitäntöjen määrällä, mikä johtuu muun muassa käytössä olevasta laitteistoinfastruktuurista sekä laitteiden korkeasta kehitysasteesta. Tätä suuremmilla määrillä kääntösiru- ja kantonauhatekniikka ovat vallitsevia tekniikoita ja yli 2000 liitännän tapauksissa kääntösirutekniikka on käytännössä ainoa toteuttamiskelpoinen ratkaisu [35].

On huomattu, että piisirujen I/O-liitäntöjen määrä on karkeasti ottaen verrannollinen piirien monimutkaisuuden kanssa. Yhteyden piirin monimutkaisuuden ja I/O-liitäntöjen määrän välillä määritteli ensimmäisenä E. F. Rent. Hänen mukaansa on nimetty yhtälönä (2.1) esitetty *Rentin sääntö*, jolla voidaan arvioida piirin I/O-liitäntöjen määrää piirillä olevaan transistorien lukumäärään verrattuna. [15]

$$P = K \times G^{\beta} \quad (2.1)$$

Yhtälössä (2.1): P = I/O-liitäntöjen määrä sirulla
 K = I/O-liitäntöjen keskimääräinen määrä hilalla
 G = hilojen lukumäärä
 β = Rentin eksponentti, sovelluksesta riippuen 0,1...0,7.

Kääntösirutekniikan myötä myös sirujen monimutkaisuus on lisääntynyt, sillä liitäntöihin pystytään käyttämään tehokkaasti koko sirun aktiivista alaa. Samaan aikaan liitäntöjen vapaammalla sijoittelulla esimerkiksi tehon ja kellosignaalien reitittämistä sirun

layout-suunnittelussa voidaan helpottaa ja suorituskykyä parantaa, sillä sirulle kasvatettavan alumiinin sähköiset ominaisuudet ovat yleensä heikommat alustalla käytettäviin materiaaleihin verrattuna. [27]

Seuraavissa kappaleissa käsiteltäville juote- ja liimaliitostekniikoille löydetään sekä etuja että haittoja toisiinsa nähden ja perusteet molempien käyttämiselle ovat olemassa. Elektroniikan pintaliitostuotannossa sekä liimojen että tekniikoiden käytön hinta vakiintuneen vanhempien tekniikoiden tasolle samalla, kun liimaliitosten pitkäaikaisuudesta saadaan yhä enemmän tietoa. Kuitenkin esimerkiksi LCD-näyttötekniikoissa liimojen käyttö on tällä hetkellä vallitseva tekniikka.

2.1. Kääntösirujen liimaliittäminen

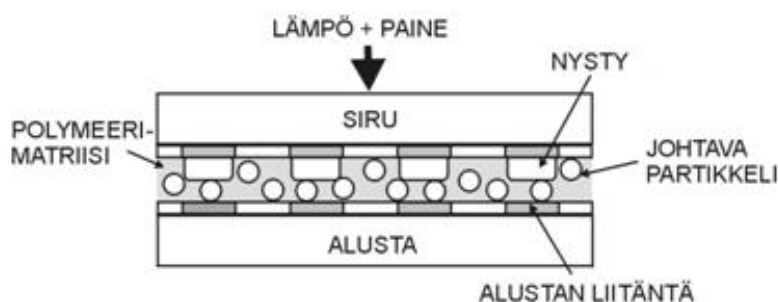
Kääntösirujen liimaliittämiseen voidaan käyttää sähköisesti johtavia liimoja (*ECA*), jotka jaotellaan täysin johtaviin isotrooppisiin liimoihin (*ICA*) ja Z-akselin suuntaisesti tai vertikaalisesti johtaviin anisotrooppisiin liimoihin (*ACA*). Kääntösirujen liittämiseen voidaan käyttää myös täysin johtamattomia liimoja (*NCA*). Materiaalikoostumukseltaan johtavat liimat ovat komposiitteja eli kerta- tai kestopohjaisiin polymeerimatriiseihin on lisätty johtavia partikkeleita, joiden materiaalina käytetään esimerkiksi kultaa, hopeaa, nikkeliä tai kuparia. Liiman sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet saadaan pääosin tämän komposiitin eri osatekijöistä. Johtavat liimat ovat sähköisiltä ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan erinomaisia sirujen liittämiseen. Isotrooppisen ja anisotrooppisen liiman johtavuus on toteutettu pääosin käyttämällä liimamateriaalissa eri määriä johtavia partikkeleita ja ne erotellaan toisistaan perkolaatioteoriaa soveltamalla. Liimoja voidaan toimittaa joko neste-, pasta- tai filmimuotoisena. [20]

Perkolaatioteorian mukaisesti materiaalin perkolaatiokynnys on se kriittinen tilavuusosuus, jossa komposiitin resistiivisyys laskee jyrkästi ja se alkaa johtaa. Hyvä esimerkki on anisotrooppinen liima, joka on polymeerimatriisi, johon on lisätty johtavia partikkeleita. Anisotrooppisen liiman perkolaatiokynnys ylittyy Z-akselin suuntaisen paineen ja lämmön vaikutuksesta, kuten kuvassa 2.2 on esitetty. Perkolaatiokynnyksen ylittyttyä johdemateriaalipartikkeleiden lisäämisellä ei saavuteta merkittävää lisäystä komposiitin johtavuuteen. [12]

Anisotrooppinen liima annostellaan sellaisenaan koko sirun alle joko nestemäisenä, pasta- tai filmimuotoisena. Liimaliittämisen eduista puhutaan erityisesti anisotrooppisten liimojen yhteydessä, koska ne eivät vaadi annostelulta erityistä tarkkuutta vaan voidaan annostella esimerkiksi kastamalla siru liimaan. Liimaliittäminen vaatii kuitenkin prosessilta enemmän, sillä suuremman kohdistustarkkuuden lisäksi tuotantolaitteistolta vaaditaan kykyä tuottamaan sopiva paine ja lämpötila sopivan ajan verran liiman kovettamiseksi. Koska polymeerimatriiseilla on erinomaisten sähköisten ominaisuuksien lisäksi hyvät mekaaniset ominaisuudet kovettuina lämpötilan ollessa lasittumislämpötilan T_g

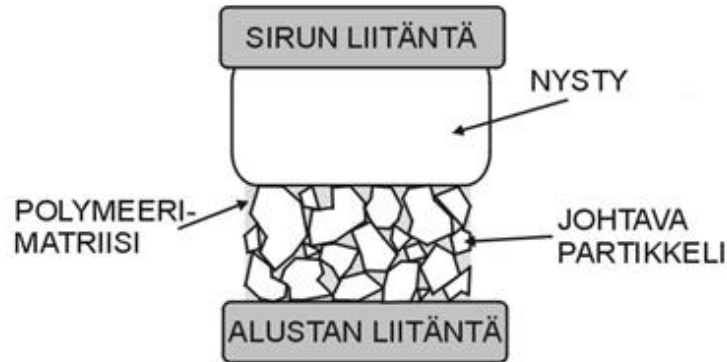
alapuolella ja liimalla täytetään koko sirun ala, erillistä välitäytettä ei tarvita. Liitosprosessi ei vaadi myöskään erillistä juoksutetta. [20]

Anisotrooppiset liimat saadaan johtamaan vain Z-akselin suuntaisesti pitämällä komposiitin adheesiomateriaaliin tasaisesti jakautuneiden johdepartikkelien määrä perustilassa perkolaatiokynnyksen alapuolella; johdepartikkeleita anisotrooppisessa liimassa on noin 5-20% tilavuudesta. Johtavuus alustan liitännöiden ja nystyjen välille saadaan aikaiseksi käsittelemällä annosteltua liimaa Z-suuntaisen paineen ja lämmön avulla. Paineen ja lämmön vaikutuksesta adheesiomateriaali painuu kasaan nystyjen paineen alla; johtavuus syntyy, kun johdepartikkelit puristuvat nystyn ja liitännän välille. Kuvassa 2.2 on anisotrooppisen liimaliitoksen perusrakenteen poikkileikkaus siinä tuotantovaiheessa, kun siru altistetaan lämmön ja paineen vaikutukselle ja osa johdepartikkeleista puristuu nystyn ja liitännän väliin. Huomattavaa on, että johtava liitos saadaan aikaan jo pienellä johdepartikkeleiden määrällä. [20]



Kuva 2.2. Anisotrooppisen liiman käyttö kääntösiruliitoksessa. Muokattu lähteestä [20].

Isotrooppisilla liimoilla perkolaatiokynnys on selkeästi ylittynyt ja niitä voidaan verrata perustellusti juotteisiin. Isotrooppiset liimat on annosteltava selektiivisesti esimerkiksi stensiilin tai ohjelmoitavan annostelijan avulla, sillä ne johtavat käsittelystä riippumatta kaikkiin suuntiin. Kääntösirujen liittämässä ne vaativat erillisen välitäytteen liitoksen luotettavuuden parantamiseksi, kuten juoteliiitoksetkin. Isotrooppisen liiman käyttö kääntösiruliitoksessa on kuvattuna yhden nystyn ja liitännäparin osalta kuvassa 2.3. Kuvasta huomataan johtavien partikkeleiden suuri määrä, jolloin liimamateriaali pystyy johtamaan sähköisesti kaikkiin suuntiin. Kuvan mukaisesti liima annostellaan vain liitännöiden kohdalle, jotta oikosuluilta vältytään. Kääntösirutekniikassa isotrooppista liimaa voidaan suoran siruliitosten lisäksi käyttää myös sirujen nystytykseen kustannustehokkaasti. [20]



Kuva 2.3. Isotrooppisen liiman käyttö kääntösiruliitoksessa. Muokattu lähteestä [20].

Johtamattomia liimoja käytetään kiinnittämään kääntösiru mekaanisesti kiinni alustaan sähköisesti passiivisista kohdistaan, jolloin sähköinen yhteys sirun ja alustan liitäntöjen välille muodostetaan suoraan sirun nystyjen ja alustan liitäntöjen välille. Molemmat on usein valmistettu tai pinnoitettu kullalla, mikä varmistaa erittäin luotettavan sähköisen yhteyden. Liimamateriaalina käytetään useimmiten polymeerimatriiseja, jotka kutistuvat kovetettaessa, jolloin liitoksesta saadaan erittäin luja ja matriisi toimii jousenomaisesti sirun ja alustan välillä. [7]

2.2. Kääntösirujen juoteliittäminen

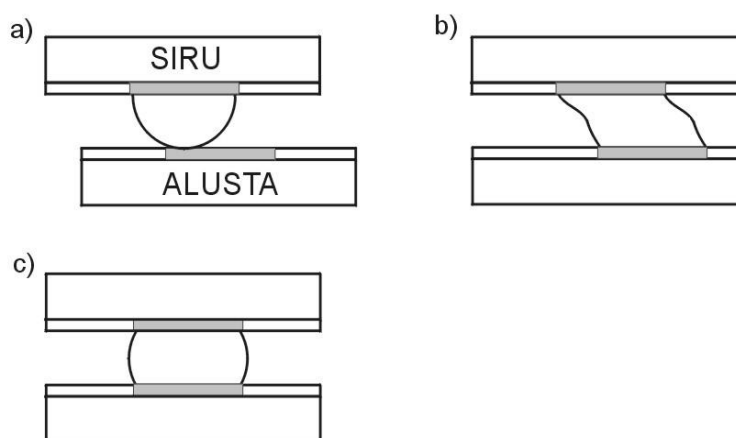
Eutektisellä seoksella tarkoitetaan materiaaliseoksen koostumusta, jolla sen sulamispiste on mahdollisimman alhainen. Jähmettyessään eutektisen seoksen materiaalit kovettuvat lamellimaisesti toistensa lomiin muodostaen lujan seoksen. Esimerkiksi tina-lyijy-seoksen eutektinen piste on Sn61,9%/Pb38,1%. RoHS-direktiivin mukaisista lyijyttömistä juoteseoksista useat eivät ole eutektisia. Näissä seoksissa jokin seoksen materiaaleista on toisia hallitsevampi, jolloin sulaminen ja jähmettyminen eivät tapahdu kaikkien seospartikkeleiden osalta täysin samaan aikaan, mikä vaikuttaa muun muassa jähmettyneen materiaalin koostumukseen. [4]

IBM:n kehittämässä C4-tekniikassa käytettiin juotenystyjä, jotka olivat materiaaliltaan erittäin lyijypitoisia seoksen ollessa 5Sn/95Pb tai 3Sn/97Pb ja sulamispisteen ollessa 308 °C tai 314 °C. Näissä prosesseissa käytettiin useimmiten keraamisia alustoja, joiden lämpölaajenemiskerroin on erittäin yhteensopiva piin kanssa. Ottaen huomioon myös hyvän itsekohdistuksen, tuloksena saatiin korkea saanto. Itsekohdistusta käsitellään tarkemmin kappaleen loppuosassa. [14]

Juoteliitettävän kääntösirutekniikan vahvuudet tulevat esiin erityisesti tavallisilla tuotantolinjoilla pintaliitostekniikan rinnalla edullisille alustoille. Tämä edesauttoi juotenystyjen lyijypitoisuuden vakiintumisen korkeista lyijypitoisuuksista ladottavien komponent-

tien kanssa yhteensopivaksi. Yleisimmin käytetty tina-lyijy-juotteen koostumus oli 63Sn/37Pb, joka on lähellä eutektista pistettä ja seoksen sulamispiste on 183 °C. [14]

Juoteliittämisessä on sekä pintaliitos- että kääntösirutekniikassa siirrytty lyijyttömien juotteiden käyttöön vuonna 2006 voimaan astuneen RoHS-direktiivin (*The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*) ansiosta [36]. Lyijyttömiä juotteita on tämän vuosituhanen puolella tutkittu suurella intensiteetillä, jotta 63Sn/37Pb-juotteelle löydettäisiin kaikilta ominaisuuksiltaan vastaavia tai parempia kustannustehokkaita eutektisia seoksia. Suurimpana ongelmana on pidetty sulamispisteen nousemista sekä materiaalikustannusten nousua. Yleisimmin käytetyt lyijyttömät juotteet koostuvat hopeasta, tinasta ja kuparista. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää eutektista 95,5Sn/3,8Ag/0,7Cu-seosta, jonka sulamispiste on noin 217°C. Tutkimusten perusteella lyijyttömät hopea-tina-kupari-juotteet ovat pitkäaikaisuuteltaan tina-lyijyjuotteita parempia ja edellä mainittua eutektista seosta voidaan pitää luotettavampana kuin vastaavia hyper- ja hypoeutektisia seoksia [23].

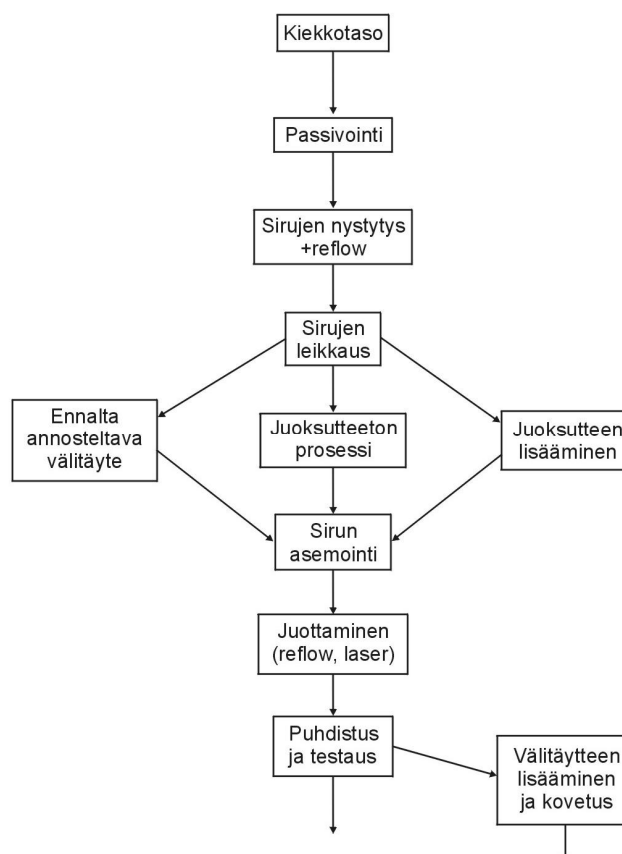


Kuva 2.4. Juoteliitoksen itsekohdistuksen periaate. Muokattu lähteestä [16].

Juoteliitoksen eduksi liimaliitoksiin verrattuna voidaan laskea parempi yhteensopivuus pintaliitostekniikan ja olemassa olevien tuotantoinfrastruktuurien kanssa [38]. Suurin etu juoteliittämiselle saavutetaan sulan juotteen ja liitäntöjen välisistä pintajännityksistä aiheutuvasta passiivisesti tapahtuvasta itsekohdistuksesta, jonka periaate on esitetty kuvassa 2.4. Kuvan 2.4 a-kohdassa huomataan sirun ja alustan välillä kohdistusvirhe, mutta nysty osuu kuitenkin liitännän alueelle. Seuraavassa kohdassa prosessin lämpötila on juotenystyn sulamispisteen yläpuolella ja juote kostuttaa koko alustan liitännän ja jäähtyessään juotenystyt vetävät sirun kohdalleen, joka on havainnollistettu kuvan c-kohdassa. Itsekohdistuksen avulla päästään jopa mikrometrin osien tarkkuuteen [9][16] ja se voi korjata jopa useiden kymmenien prosenttien toleranssin huonosti onnistuneessa sirun kohdistuksessa [14][26], kun liimaliittäminen vaatii tuotantolaitteistolta suurta tarkkuutta pienillä toleransseilla.

2.2.1. Juoteliitosprosessi

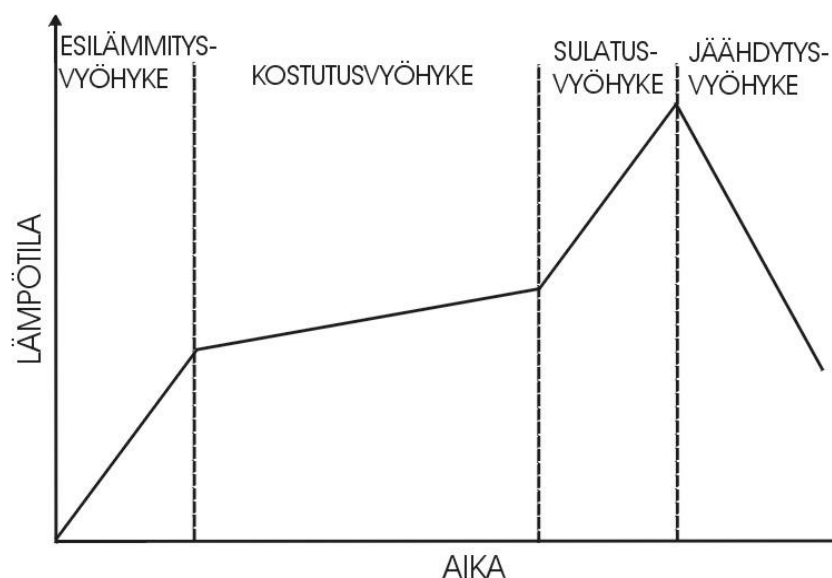
Juoteliitettävän kääntösirun liitosprosessikaavio on esitetty kuvassa 2.5. Ennen irroitusta piikiekolta sirut nystytetään. Nystyjä ja nystytysprosessia käsitellään kappaleessa 2.2.2. Sirut irrotetaan toisistaan kiekolla sahaamalla ne erilleen timanttiteriä tai lasereita käyttämällä. Sirut toimitetaan useimmiten kokonaisina kiekkoina, jolloin varsinainen irrotus kiekolta jää sirujen loppukäyttäjälle tai tuotantolaitteelle. Automaattisilla tuotantolaitteilla sirut poimitaan suoraan kiekolta useimmiten imun avulla ja kohdistetaan kohdistusmerkkejä lukemaan ohjelmoitujen kameroiden avulla X-, Y- ja Z-koordinaatiston sekä sirun ja alustan välisen X-tason rotaatiokulman ϕ avulla. Kiinnityksen varmistamiseksi siru voidaan joko kasta juoksutteeseen tai alustalla voidaan käyttää juoksutetta tai ennalta annosteltavaa välitäytettä. Juoksutteen tarkoituksena on sirun alustavan kiinnityksen lisäksi puhdistaa sekä sirun että alustan liitännät epäpuhtauksista, kuten oksideista, ja parantaa juotteen kostutusta juotosvaiheessa. Ennalta annosteltavaa välitäytettä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3. [26]



Kuva 2.5. Juoteliitettävän kääntösirun prosessikaavio. Muokattu lähteistä [14][26].

Kääntösirun juottaminen voidaan suorittaa esimerkiksi reflow-prosessissa tai selektiivisesti laserin avulla. Molemmat tekniikat perustuvat juotteen annosteluun ennalta; kääntösirun tapauksessa juote on joko sirussa juotettavana tai juotteella päällystettynä nystynä tai annosteltuna alustalle pastamuodossa.

Elektroniikkateollisuudessa yleisesti käytetyssä reflow-prosessissa juottaminen tapahtuu kuumakonvektiouunissa pääsääntöisesti neljässä lämpötilavyöhykkeessä. Esimerkinomainen reflow-profiili vyöhykkeineen on esitetty kuvassa 2.6. Esilämmitysvyöhykkeellä lämpöä nostetaan riittävän hitaasti, etteivät komponenttien ja sirujen materiaalit halkea nopean lämpenemisen seurauksena. Kostutusvyöhykkeellä lämpötila pidetään tasaisena ja lämpötilaerot tasaantuvat samalla kun juoksute aktivoituu ja valmistaa liittännät juotteen kostutusta varten. Sulatusvyöhykkeellä lämpötila nostetaan riittäväksi ajaksi juotteen sulamispisteen yläpuolelle, jolloin juottuminen pääsee tapahtumaan. Lopuksi lämpö lasketaan hallitusti jäähdytysvyöhykkeellä, jolloin sulanut juote jähmettyy ja liitos muodostuu ilman liian nopeasta jäähtymisestä johtuvia rikkoutumisia tai muodonmuutoksia. Lopuksi alustalle jääneet juoksutteen jäämät puhdistetaan, sillä ne voivat aiheuttaa korroosiota tai metallien migraatiota sekä aiheuttaa välitäytteen tai suojaopinnoitteen adheesion huonontumista, mikä voi johtaa delaminaatioon. [26]



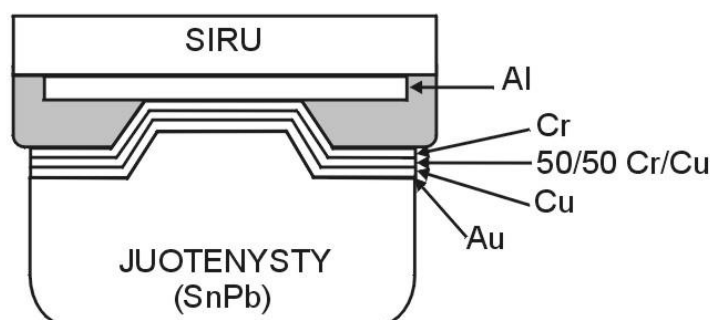
Kuva 2.6. Esimerkinomainen reflow-profiili vyöhykkeineen.

Laserin hyväksikäyttö elektroniikan juotosprosesseissa on kohtalaisen uutta tekniikkaa, vaikka sen sovelluksia onkin tutkittu aktiivisesti jo pitkään. Kääntösirujen liittämässä selektiivisellä laserjuottamisella on selkeitä etuja reflow-prosessiin verrattuna, sillä esimerkiksi pulssi-laseria käyttämällä juottamisprosessi pystytään suorittamaan hyvin nopeasti, noin 0,01-0,1 millisekunnin aikana yhtä juotenystyä kohden eikä pulssi-laserin yhteydessä käytetä erityistä lämmitysprofiliä. Erittäin merkittävänä etuna selektiiviselle juottamisprosessille voidaan myös mainita sen tuottama pieni lämpöhaitta materiaaleille reflow-prosessiin verrattuna, sillä laserjuottamisessa lämpökuorma kohdistuu ainoastaan sulatettaviin juotteisiin eikä nosta merkittävästi ympäröivien materiaalien lämpötilaa. [8][32]

2.2.2. Liitosnystyt ja -materiaalit

Heinäkuussa 2006 voimaan astunut RoHS-direktiivi koskee erilaista kodin elektroniikkaa, ja se on kansallisessa lainsäädännössä nimetty muotoon “Valtioneuvoston asetus vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa”. Direktiivi vaikutti elektroniikkateollisuudessa käytettäviin materiaaleihin kieltäen esimerkiksi yleisesti juotteissa käytetyn lyijyn kokonaan direktiivin alaisissa tuoteryhmissä. Lyijyn lisäksi direktiivissä kielletään elohopea, kadmium, kuudenarvoinen bromi, polybromibifenyylit ja polybromidifenyyleetterit, joista jälkimmäiset ovat useissa muoveissa käytettyjä palonestoaineita [36]. Kuten aiemmin on todettu, lyijystä luopuminen vaikutti suoraan elektroniikassa käytettäviin juotteisiin. Tässä kappaleessa käsitellään kääntösirutekniikassa käytettäviä juotenystyjä, nystyjen rakennetta, muodostusprosesseja sekä nystyjen materiaaleja RoHS-direktiiviä ja sen materiaalivaatimuksia mukailleen.

Kääntösirutekniikassa käytetään pääosin kahta kontaktimetallointitekniikkaa, sirulle muodostettavaa nystynalusmetallointia (*UBM*, under bump metallization) tai alustan kontaktimetallointia (*TSM*, top surface metallurgy) luotettavien liitosten muodostamiseksi ja ylipäätään prosessien mahdollistamiseksi. Kuvan 2.7 mukaisella nystynalusmetalloinnilla tarkoitetaan nystyjen ja sirun metalloinnin välisiä ohuita, noin 5-15 μ m paksuisia metallikerroksia. Kuvassa esitetään perinteinen kromi-kupari-kulta-metallointi IBM:n C4-prosessin mukaisesti. Niiden tarkoituksena on parantaa nystyjen adheesiota, pienentää nystyn kontaktivastusta sirun metallointiin ja suojata sitä; siruliitännöiden yleisimpiä metallointimateriaaleja ovat alumiini ja kupari, jotka erityisesti ohuina oksidoituvat erittäin helposti käyttökelvottomiksi, sillä esimerkiksi alumiinioksidi on luja ja kemiallisesti vakaa sähköeriste. Lisäksi eri kerrosten materiaalit on valittava sopivasti, sillä metallikerrosten välillä voi tapahtua diffuusiota, joka voi heikentää liitoksen luotettavuutta. [14][26]



Kuva 2.7. IBM:n C4-prosessin kromi-kupari-kulta-metallointi. Muokattu lähteestä [14].

Nystynalusmetallointi voidaan muodostaa sirun pinnalle joko höyryvaporisaatio-, sputterointi- tai kemiallisessa pinnoitusprosessissa mahdollisesti tarvittavien maskien avulla. Maskiin voidaan käyttää esimerkiksi metallimaskitekniikkaa tai fotolitografiaa. Maskit-

tomien prosessien etuna on mahdollisuus pinnoitteen kasvattamiseen kaikissa suunnissa, sillä maski sallii kasvattamisen vain Z-suunnassa. Höyryvaporisaatioprosessissa annosteltava metalli lämmitetään kaasumuotoon tyhjiössä esimerkiksi sähkövirtaa käyttämällä ja pystytään annostelevaan kohteeseensa. Höyryvaporisaatioprosessi on suhteellisen hankalasti hallittavissa ja sitä käytetään puolijohdeteollisuudessa pääosin ohuiden alumiinikerrosten muodostamiseen alumiinin alhaisen sublimoitumispisteen vuoksi. Höyryvaporisaatiota käsitellään tarkemmin paryleenin yhteydessä kappaleessa 4.4. Sputterointiprosessi on monimutkaisempi ja hitaampi, mutta helpommin hallittava ja sopii ainakin teoriassa lähes kaikille metalleille. Prosessissa käytetään korkeaenergisiä kaasuioneja, usein argonia, joilla metalliatomeja pommitetaan yksitellen kunnes ne irtoavat ja ne pystytään ohjaamaan suoraan kohteeseen, johon pystytään kasvattamaan tasalaatuinen kalvo. Kemiallinen pinnoitus voidaan suorittaa joko elektrolyytisesti eli galvanisesti tai kemiallista höyrystymistä ja immersiota hyväksi käyttämällä. Näistä jälkimmäinen on erittäin yksinkertainen, edullinen ja tasalaatuisten tuloksen antava prosessi, joka perustuu ionien katalyyttiseen kertymiseen kohteeseen. [26]

Nystyjen muodostamisen ja nystynalusmetalloinnin välillä on vain pieniä eroja prosessin ja materiaalien suhteen, sillä metallointiprosessia voidaan jatkaa, kunnes tuloksena on halutunkokoinen ja -muotoinen nysty. Ero voidaan muodostaa määritelmässä: nystynalusmetalloinnilla tarkoitetaan ohutta metallikerrosta, jota käytetään pohjusteena nystyille. Usein käytettyjä nystytysprosessin menetelmiä ovat elektrolyysipinnoitus-, lankaliitos-, höyrystys-, silkipaino-, metallisuihku-, nystyjen siirto-, kemialliset ja juotteen annostelumenetelmät. Sopivan menetelmän valinta riippuu halutusta nystyn muodosta, mittakaavasta ja tiheydestä sekä kustannustekijöistä, joihin vaikuttaa myös tuotantovolyymien suuruus. [22][26]

Nystyjen muoto ja materiaalit riippuvat käytettävästä sovelluksesta ja ainoana yleispäteväna vaatimuksena nystyille voidaan esittää, että nystyn pitää olla johtavaa materiaalia ja sen on oltava riittävän lujaa pitämään siru kiinni alustassaan. Kääntösirun liitosnystyt voivat olla joko sulamattomia, jolloin liitokseen tarvitaan erillinen juote, tai sulavia, jolloin nystymateriaali itsessään pystyy muodostamaan liitoksen riittävässä lämpötilassa. Sulamattomien nystyjen materiaalina käytetään usein kultaa, nikkeliä tai johtavia polymeerejä, jotka pystytään liittämään myös suoraan sirun alumiiniin. Sulamattomia nystyjä käytetään nykyisin erityisesti liimaliitettävissä siruissa, tosin myös juoteliitos onnistuu erillistä juotetta käyttämällä. Sulavien nystyjen materiaalina käytettiin jo C4-tekniikassa korkeassa lämpötilassa sulavia tina-lyijy-juotteita, jotka voivat olla myös kerrostetusti valmistettuja, eli tina on nystyn päässä ja sulaa ensin. Nykyään nystyjen materiaalina käytetään useimmiten eutektista juoteseosta, mutta myös kestopuovisia polymeerinystyjä. Polymeerinystyjen käyttö on yleisempää liimaliitoksissa. [26]

Myös alustan liitännöille voidaan muodostaa kontaktimetallointi luotettavan liitoksen onnistumisen todennäköisyyden parantamiseksi. Alustan kontaktimetallointien metal-

lurgiaa kutsutaan *TSM*-metalloinniksi ja se muodostetaan paksukalvoisena edullisesti silkkipainotekniikalla tai ohutkalvoisena samoilla prosesseilla kuin nystynalusmetallintikerrokset. Alustan johdinmetallointi muodostetaan useimmiten kuparista, joka hyvistä ominaisuuksistaan huolimatta oksidoituu herkästi. Kontaktimetallointi voidaan muodostaa esimerkiksi ohut- tai paksukalvomenetelmällä ja materiaaleina käytetään usein nikkeli-kulta-pinnoitetta ja sen tarkoituksena on estää oksidoituminen sekä taata parempi kostutuspinta kuin pelkkää juoksutetta käyttämällä. [14]

2.3. Kääntösiruliitosten luotettavuus

Elektroniikan luotettavuus ja laatu ovat erittäin subjektiivisia käsitteitä ja ne määritellään lähteestä riippuen eri tavalla. Elektroniikan luotettavuus keskiarvoisena lukuna on aina määriteltävissä käyttäjän odotusten ja käyttöympäristön mukaan ja käsitteenä hyvinkin verrattavissa laatuun. Luotettavuutta voidaan kuvata esimerkiksi seuraavien määritelmien avulla:

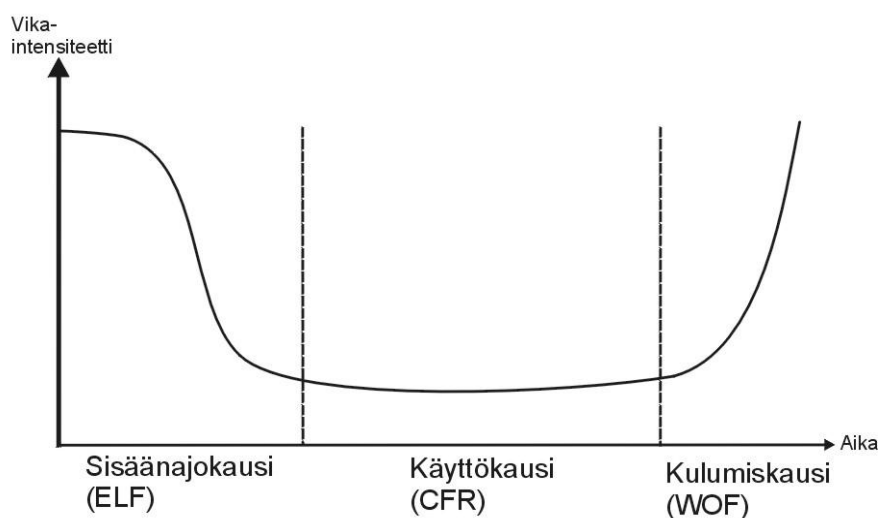
- 1) Luotettavuus on järjestelmän kyky toimia tietyissä olosuhteissa määritellyn ajan ilman tietyn vikatason ylittämistä.
- 2) Luotettavuus on järjestelmän tai komponentin kyky suorittaa vaadittu toiminto tietyissä olosuhteissa.
- 3) Luotettavuus on se todennäköisyys, jolla järjestelmä toteuttaa vaaditut toiminnot tietyn ajan kuluessa määrätyissä ympäristöolosuhteissa.
- 4) Mikroelektroniikan pakkaustekniikassa luotettavalla pakkauksella tarkoitetaan sitä, että laite suorittaa siltä odotetun elektronisen funktion sen normaaleissa käyttöolosuhteissa odotetun elinkaaren ajan.

[3][18][35]

Elektroniikan integroitua yhä pienempiin kokonaisuuksiin myös luotettavuuden merkitys suunnittelussa (*DFR*, design for reliability) kasvaa, sillä mikroelektroniikan luotettavuutta voidaan merkittävästi parantaa huomioimalla materiaalien ja prosessien rajoitukset ja mahdollisuudet jo suunnitteluvaiheessa. Luotettavuutta ja laitteen mekaanista kestävyyttä erilaisissa olosuhteissa ja olosuhteiden muuttuessa voidaan mallintaa joko elementtimenetelmien (*FEM*, finite element method) avulla tai kiihdytetyin testein ja analysoimalla tuloksia vikaantumisten perusteella. Kun mahdolliset vikaantumismenetelmät opitaan tuntemaan mallinnus- tai testitulosten perusteella, voidaan mahdolliset epäkohdat ottaa seuraavassa suunnittelusykliissä huomioon ja tuloksena on entistä luotettavampi laite. [35]

Elektronisen laitteen luotettavuutta sen elinkaaren aikana voidaan kuvata niin kutsutun kylpyammekäyrän (bathtub curve) mallisesti, vaikka huomioitavaa onkin, että käytännössä käyrän ennuste toteutuu suhteellisen harvoin perusteorian mukaisena. Kuvassa 2.8 on esitetty perinteinen kylpyammekäyrä, joka käsittelee teoreettista vikaantumistaajuut-

ta ajan suhteen. Käyrästä voidaan tunnistaa järjestelmän sisäänajovaiheessa tapahtuvat varhaisajan vikaantumiset (*ELF*, early life failure), eli niin sanottu lapsikuolleisuusvaihe, joka johtuu pääosin tuotannon viallisesta käsittelystä tai asennuksesta sekä viallisista komponenteista ja ne pyritään poistamaan populaatiosta jo tuotantovaiheessa tapahtuvalla lopputuotteen testauksella. Tämän jälkeen siirrytään elinkaaren käyttökauteen, jossa vikaantumistaajuus laskee vakioksi (*CFR*, constant failure rate) ja vikaantumisten syyt ovat satunnaisia. Käyttökauten aikaisia vikaantumia pyritään mallintamaan ja ennustamaan tekemällä kiihdytettyjä olosuhdetestejä. Järjestelmän elinkaaren loppuvaiheessa voidaan puhua kulumiskaudesta; materiaalit ja komponentit ovat ikääntyneitä ja vikaantumistaajuus nousee loppuun kulumisesta aiheutuvien vikaantumisten takia (*WOF*, wearout failure). [14]



Kuva 2.8. Niin kutsuttu kylpyamme- eli bathtub-käyrä, jolla kuvataan järjestelmän luotettavuutta elinkaaren eri vaiheissa. Muokattu lähteestä [14].

Huomattavaa on, että vikaantumiset tapahtuvat lähes aina kaikkein alimmilla laitteiston tasoilla ja järjestelmä voi olla rakenteeltaan joko sarja- tai rinnakkaismuotoinen. Sarjamuotoisessa järjestelmässä jo yksi vikaantuminen alimmalla tasolla johtaa koko järjestelmän toimimattomuuteen. Rinnakkaisessa järjestelmässä alimmalla tasolla pitää tapahtua useita vikaantumisia, jotta ne vaikuttavat kuolettavasti koko järjestelmän toimintaan. Elektroniikassa vikaantumisen seurauksilla on kaksi ääripäätä, jotka vaikuttavat pääsääntöisesti sarjamuotoisesti järjestelmän toimintaan: oikosulku ja avoin piiri sekä näiden välissä tapahtuva katkonainen toiminta. Mikroelektroniikassa vikaantumisten perisyys voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: materiaaliin kohdistuva liikarasitus (*overstress*) ja loppuun kuluminen (*wearout*), ja ne jakautuvat edelleen mekaanisiin, kemiallisiin ja sähköisiin vikaantumisiin. Liikarasituksella tarkoitetaan tilannetta, jossa materiaaliin kohdistuva jännitys ylittää yhdellä kertaa sen lujuuden ja vikaantuminen tapahtuu. Liikarasituksesta johtuvia vikaantumisia voidaan ehkäistä joko vahvistamalla materiaaleja ja liitoksia tai vähentämällä materiaaleihin kohdistuvia rasituksia. Loppuun kuluminen tapahtuu vähitellen pienillä rasitustasoilla niin, että ensin materiaalin toimin-

takyky heikkenee ja lopulta vikaantuu. Loppuun kuluminen on hankala estää täydellisesti, sillä ajan kuluessa loppuun kulumisesta aiheutuva vikamekanismi tapahtuu joka tapauksessa jollain todennäköisyydellä. Mikäli vikamekanismit kuitenkin tunnetaan hyvin, voidaan ne ottaa laitteen suunnittelussa huomioon ja vikaantumisaika voidaan pidentää hyvinkin pitkäksi. Kääntösirujen tapauksessa oleellisia ja suunnittelussa huomioon otettavia vikaantumismekanismia käsitellään kappaleessa 2.4. [35]

Juoteliitettävien kääntösirujen luotettavuus perustuu pitkälti materiaalien epämuodostumiseen, lämpölaajenemiskerrointen eroista johtuvien mekaanisten rasitusten sekä ympäristön kemiallisten rasitusten sietoon. Koska pääosaa juoteliitettävien kääntösirujen vikaantumismekanismista osataan aina odottaa, ne pystytään ottamaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa ja niiltä suojautumiseen osataan varautua ja niitä pystytään mallintamaan tai testaamaan. Kiihdytettyjen lämpö- ja kosteusolosuhdetestausten lisäksi mikroelektronikalle pystytään tekemään esimerkiksi tärinänsietoon, vetolujuuteen tai muihin mekaanisiin ominaisuuksiin perustuvia testejä sekä pudotustestejä, joiden perusteella järjestelmän elinkaarta pystytään kohtuullisella tarkkuudella simuloimaan ja korjaamaan mahdolliset suunnittelusta ja materiaalivalinnoista johtuvat epäkohdat. Näille simulaatioille ja elektroniikan luotettavuusvaatimuksille standardeja ovat luoneet muun muassa *JEDEC* ja *IPC* sekä Yhdysvaltain armeija *MIL-STD*-standardien muodossa. [3][14]

On esitetty, että järjestelmän lämpötilan noustessa 10 °C sen elinikä tippuu puoleen ja neljäsosaan lämpötilan noustessa 20 °C ja on väitetty, että jopa puolet kaikista elektroniikassa tapahtuvista vikaantumisista johtuu lämpötilasta ja sen vaihtelusta. Yhtälönä 2.2 esitetty *Arrheniuksen yhtälö* [14] ennustaa laitteen elinikää lämpötilan funktiona, minkä perusteella lämpötilan nousua käytetään kiihdytetyssä olosuhdetestauksessa nopeuttamaan vikaantumisen tapahtumista. Yhtälö perustuu kemiallisten reaktioiden ja materiaalien diffuusion kiihtymiseen lämpötilan noustessa ja näiden kriittisen pisteen ylittymiseen, mikä johtaa vikaantumiseen.

$$r(T) = Ae^{\frac{E_a}{k\Delta T}} \quad (2.2)$$

Yhtälössä (2.2): $r(T)$ = laitteen vikaantumisaika

A = laitekohtainen vikaantumiskerroin

E_a = reaktion aktivoitumisenergia [eV]

k = Boltzmanin vakio ($8,6171 \cdot 10^{-5}$ eV/K)

ΔT = lämpötilan muutos [K].

Lämpösyklitit perustuvat edellisessä kappaleessa mainittujen tahojen standardeihin ja erityisesti yksinkertaisimpien testien kohdalla standardit eroavat varsin vähän toisistaan. Perinteisiä mikroelektronikan lämpösyklitestejä on määritelty muun muassa *JESD22 A104*- ja *MIL-STD-883*-standardiperheissä. Standardeissa määritellään olosuhdetestauk-

nessa käytettävät parametrit, kuten lämpösykliä lukumäärä, pitoajat ääriämpötiloissa, lämpötilojen muutosnopeudet ja ääriämpötilat. Lämpösykli- ja shokkitestauksella aikaansaattavia kääntösirujen vikaantumismekanismeja on käsitelty seuraavassa kappaleessa. [18]

2.4. Kääntösiruliitosten vikaantumismekanismit

Materiaaleissa tapahtuu muodonmuutoksia, kun niihin kohdistuu joko ulkoisia tai sisäisiä jännityksiä esimerkiksi lämpölaajenemisen johdosta. Aluksi muodonmuutokset, eli deformaatiot, ovat elastisia eli palautuvia. Vaikuttavan voiman kasvaessa yli materiaalin myötörajan muutokset muuttuvat plastisiksi eli pysyviksi. Materiaalin deformaatioon vaikuttavia ominaisuuksia ovat *Youngin moduli* eli kimmokerroin sekä jännitys, joiden tuloon deformaatio on suoraan verrannollinen yhtälönä 2.3 esitetyn *Hooken lain* mukaisesti. Kimmokerrointa voidaan pitää materiaalin lujuuden mittana, ja sen arvot ovat yleisesti keraameilla suurempia kuin metalleilla, ja materiaalista riippuen metalleilla suurempia kuin polymeereillä. Lujuuksien suhteista eri materiaalien välillä saadaan suhteellisen hyvä käsitys kääntösiruliitoksen materiaaleihin kohdistuvista jännityksistä. [4]

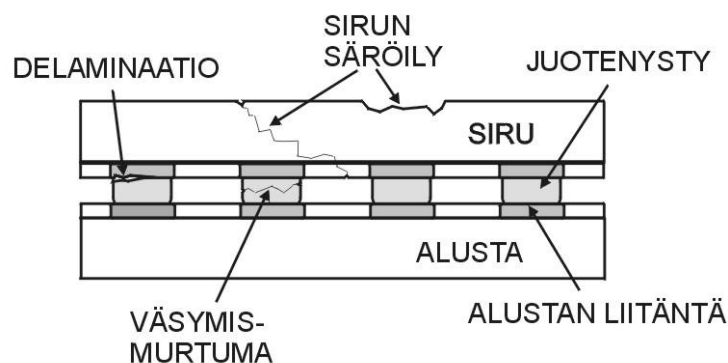
$$\sigma = E\epsilon \quad (2.3)$$

Yhtälössä (2.3): σ = materiaaliin kohdistuva jännitys [N]

E = Youngin moduli eli materiaalin kimmokerroin [N/m^2]

ϵ = materiaalin venymä [m^2]

Kääntösiruliitosten vikaantumismekanismit jaetaan mekaanisiin, termomekaanisiin, kemiallisiin ja sähköisiin vikaantumismekanismeihin, jotka johtuvat loppuun kulumisesta tai liikaräsituksesta [35]. Kappaleessa kuvattuja kääntösirulle ominaiset vikaantumismekanismit on esitetty kuvassa 2.9.



Kuva 2.9. Kääntösirulle ominaisia vikaantumismekanismeja.

Delaminoitumisella tarkoitetaan toisiinsa vierekkäin liitettyjen materiaalikerrosten irtoamista, mikä on seurausta matalasta adheesiovoimasta pintojen välillä. Delaminaatio on usein kosteudesta aiheutuva ongelma, mutta myös liitospinnalla olevat epäpuhtaudet,

kuten pöly, epäorgaaniset ja orgaaniset epäpuhtaudet, estävät materiaalikerrosten kunnollisen kiinnittymisen. Kääntösiruliitoksissa delaminaatiota tavataan useimmiten välitaytteen ja sirun sekä välitaytteen ja alustan välillä, jolloin irtoaminen tapahtuu tyypillisimmillään sirun passivointikerroksen ja välitaytteen rajapinnalla tai välitaytteen ja juotemaskin rajapinnalla. Materiaalien huono yhteensopivuus lisää adheesio-ongelmia ja kasvattaa delaminaation todennäköisyyttä, joten delaminaatiolta voidaan välttyä pyrkimällä parantamaan materiaalikerrosten välinen adheesio mahdollisimman hyväksi. Adheesio on riippuvainen muun muassa pintamateriaalien yhteensopivuudesta sekä niiden puhtaudesta prosessissa, joten adheesiota voidaan parantaa esimerkiksi sopivalla pintakäsittelyllä, puhdistuksella ja tarkoituksenmukaisesti säädetyillä prosessiparametreilla. [35]

Väsyminen on materiaalin rakenteen heikkenemistä pitkäaikaisen tai toistuvan rasituksen vaikutuksesta; vaikka rasitus olisikin erittäin vaihtelevaa eikä materiaalin myötölujuutta ylitettäisi, niin vikaantuminen voi tapahtua ajan kuluessa. Väsymismurtuma muodostuu kolmessa vaiheessa: särön ydintymisvaihe, särön kasvuvaihe ja lopullinen murtuma. Ydintymiselle sopivia paikkoja ovat pintanaarmut, terävät kohoumat ja urat, sekä komponentin pinta. Särö muodostuu jännityskeskittymän vaikutuksesta ja etenee jokaisen jännityssyklin mukaan. Lopullinen murtuma tapahtuu nopeasti särön saavutettua kriittisen koon. Kääntösirujen tapauksessa väsyminen johtuu erityisesti materiaalien lämpölaajenemiskertoimien eroista syntyvien termomekaanisten jännitysten seurauksena, ja sitä voidaan ehkäistä kompensoimalla syntyviä jännityksiä esimerkiksi sopivalla välitaytteellä. [4][35]

Puolijohdesirussa ilmenee säröilyä, kun vetojännitys ylittää murtolujuuden. Sirun säröily kääntösiruliitoksissa johtuu hauraaseen puolijohdemateriaaliin kohdistuvasta suuresta rasituksesta sekä materiaalin pintavirheistä, jotka pienentävät materiaalin murtolujuutta. Välitaytteen materiaalivalinta vaikuttaa säröilyalttiuteen, koska muutamat välitaytemateriaalit kohdistavat korkeita jännityskeskittymiä siruun. Välitayte voi säröillä sirun puolelta, levyn puolelta tai kauttaaltaan. Äärimmäisissä säröytymisissä välitaytekerros irtoaa sirusta, jolloin välitaytteen rasituksia tasaava vaikutus poistuu, mikä edistää nopeaa välitaytteen delaminoitumista. [35]

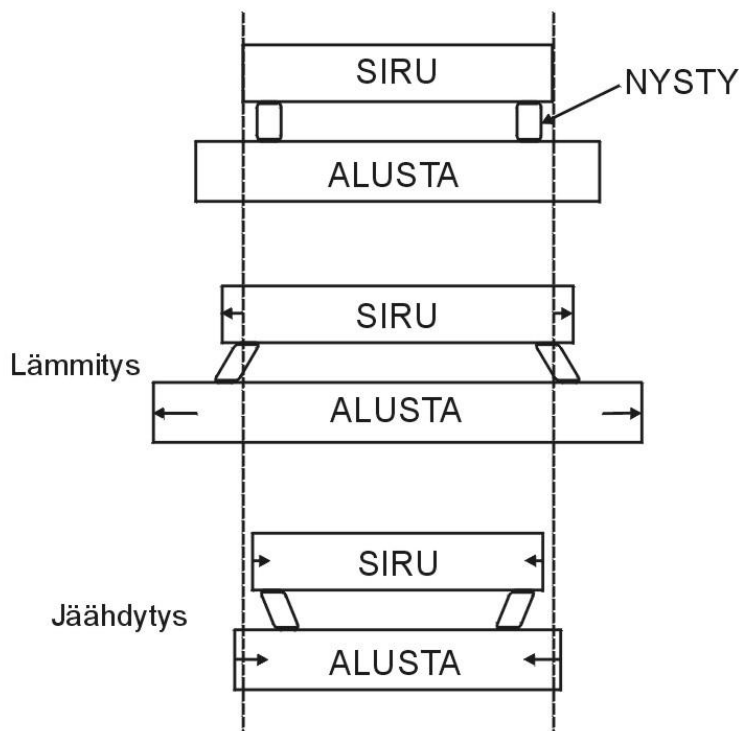
Kääntösiruliitoksissa käytettäviä välitaytteitä käsitellään tulevissa kappaleissa. Välitaytteille voidaan säröilyn lisäksi nimetä yleisesti tunnettuja vikaantumismekanismeja, jotka aiheutuvat välitaytemateriaaliin absorboituneesta kosteudesta, joka höyrystyy esimerkiksi reflow-prosessin aikana ja voi aiheuttaa jopa lämpöpaukahtelua (popcorning), joka perustuu veden tilavuuden kasvamiseen höyrystyessään moninkertaiseksi. Lämpöpaukahtelu aiheuttaa muun muassa delaminaatiota ja murtumia. Välitaytteeseen absorboitunut kosteus voi höyrystyessään myös liikuttaa epäpuhtauksia, aiheuttaa turpoamista tai höyryn paine voi aiheuttaa voimia, jotka heikentävät nystyjen rakennetta tai aiheuttavat jopa oikosulkuja. [1][10]

3. KAPILLAARINEN VÄLITÄYTE

Tässä kappaleessa käsitellään kapillaarisen välitäyteen käyttöä kääntösiruliitosten luotettavuuden parantamiseksi erityisesti edullisia ja termomekaanisilta ominaisuuksiltaan heikompia alustamateriaaleja käytettäessä. Niin kapillaarisia kuin vaihtoehtosiakin välitäyhteitä käytetään myös muiden elektroniikan tuotantotekniikoiden, kuten pieniskaa-laisten *CSP*-pakkausten, *BGA*-pakkausten sekä perinteisen pintaliitostekniikan alustamisessa sovelluksissa, joilta kaivataan korkeampaa luotettavuutta.

Elektroniikkateollisuudessa käytettäviltä tekniikoilta vaaditaan erityisesti kuluttajaelektroniikan tapauksessa mahdollisimman edullisia kokonaisratkaisuja ja muutamien vuosien elinkaarta. Toisessa ääripäässä elektroniikalta vaaditaan äärimmäisen luotettavaa toimintaa pitkälle aikavälille kustannuksista piittaamatta. Rationaalisin vaihtoehto on kääntösirujen liittäminen optimaalisille alustoille, kuten keraameille, jotka ovat liitosalustana jäykkiä ja lämpölaajenemiskerroinarvoltaan sopivia piisirun kanssa. Toisaalta kaikkiin sovelluksiin keraamialustojen käyttö ei sovi ja sirut on saatava liitettyä suoraan piirilevylle, jolloin välitäyteen käyttö tulee ajankohtaiseksi.

Edullisempänä alustamateriaalina käytetään usein orgaanista FR-4-piirilevyä, joka on mekaanisilta ja termomekaanisilta ominaisuuksiltaan heikompaa ja piin kanssa yhteensopimattomampaa keraameihin verrattuna, mutta edullista ja helposti käsiteltävää. Erityisesti FR-4-piirilevyn lämpölaajenemiskerroin on erittäin poikkeava piisiruun verrattuna, joka aiheuttaa jo juotosvaiheessa kuvan 3.1 kaltaisen tilanteen, mikä voi aiheuttaa väsymismurtumia mahdollisesti jo yhdessä syklistä. Lisäksi voidaan huomata, että sirun kasvaessa lämpölaajenemiskertoimien epäsopivuudesta johtuvat vikaantumiset kertaantuvat erityisesti sirun reunamilla, joissa jännitykset ovat suurempia muun muassa sirun ja alustan taipumisen takia. [19]



Kuva 3.1. Lämpölaajenemiskertoimien epäyhteensopivuus käänösirun ja alustan välillä aiheuttaa mekaanisia voimia juotenestyille. Muokattu lähteestä [1].

Edellä mainittuja epäyhteensopivuuksia kompensoimaan käytetään pääosin epoksiyhdisteitä, joita voidaan käyttää välitäyttemateriaalina käänösirun ja alustan välisessä tyhjässä tilassa parantamaan lämpölaajenemisyhteensopivuutta. On huomattavaa, että välitäyte ei poista lämpölaajenemisesta syntyviä jännityksiä vaan vähentää yksittäiselle liitosnystylle kohdistuvaa jännitystä, mikä on kokonaisluotettavuuden kannalta erittäin merkittävää [1].

Sopivan välitäytteen valinnalle voidaan määritellä useita parametreja, jotka perustuvat välitäytteen vaatimuksiin, haluttuihin ominaisuuksiin sekä käytettävissä oleviin prosesseihin. Välitäytteen merkitys käänösiruliitosten luotettavuuteen on osoitettu useissa tutkimuksissa ja sen merkitys pystytään osoittamaan helposti myös simuloimalla. Tässä kappaleessa käsitellään pääosin kapillaarisen välitäytteen ominaisuuksia ja vaatimuksia sekä vaihtoehtoja kapillaariselle välitäytteelle, mikä toimii lähtökohtana paryleenipinnoitteen käyttämiselle käänösirujen välitäytteenä.

3.1. Ominaisuuksia ja vaatimuksia kapillaariselle välitäytteelle

Onnistunut käänösiruliitos on riippuvainen useista parametreista, joista välitäytteen lämpölaajenemis- ja kimmokertoimien yhteensopivuus sekä alustaan, juotenestyihin että piisiruun on kriittisin [19]. Eri materiaalien tärkeimpiä parametreja voidaan käyttää hy-

väksi simuloinnissa elementtimenetelmällä (*FEM*), jonka perusteella voidaan mallintaa erilaisia materiaalivalintoja tunnetusti muuttuvissa olosuhteissa. Eräitä tärkeimpiä mallinnuksessa käytettäviä parametreja yleisimmille materiaaleille on koottu taulukkoon 3.1.

Taulukko 3.1. Esimerkkejä erilaisten kääntösiruliitoksissa käytettävien materiaalien termomekaanisista ominaisuuksista.

	Kimmokerroin Gpa	CTE ppm/°C	Lämmönjohtavuus W/m K
<i>FR-4-piirilevy</i>	20	15	15
<i>Alumina</i>	350	7	20
<i>Pii</i>	110	3	125
<i>Juotenysty (SnPb)</i>	50	25	50
<i>Epoksi</i>	8	50	0,2
<i>Paryleeni C</i>	3	35	0,2
<i>Kapillaarinen välitäyte</i>	3	35	0,2
<i>No-flow välitäyte</i>	3	60	0,2

Kapillaariselle välitäytteelle on asetettu lisäksi muita vaatimuksia, jotka ovat pääosin riippuvaisia käytettävästä sovelluksesta sekä prosessin ja ympäristön vaatimuksista. Välitäyte on kovettamattomana materiaalina nestemäistä ja sen on oltava viskositeetiltaan sopivaa, jotta se pystyy vetäytymään sirun ja alustan väliseen tilaan. Välitäyttemateriaalien ominaisuuksia voidaan muokata muita materiaaleja käyttämällä. Täytepartikkeleina käytetään usein lasia tai keraameja, jolloin välitäytteen lämpölaajenemista pystytään pienentämään ja kimmokerrointa suurentamaan lähelle juotenystyjen vastaavia ominaisuuksia. [1]

Kapillaarisilta välitäytteiltä vaaditaan erinomaista adhesiivisuutta delaminaation välttämiseksi. Kapillaaristen välitäytteiden adheesiota voidaan parantaa sekä erilaisilla tartunta-aineilla että erityisesti oikeilla ja puhtailla prosesseilla, jolloin vain materiaalien ominaisuudet vaikuttavat niiden väliseen adhesiivisuuteen. Sopivan välitäytteen annostelu- ja kovetusprosessit ovat olemassa olevaan kääntösirujen liitosprosessiin mahdollisimman sopivat, eivätkä ne saa liueta esimerkiksi juokсутteen puhdistuksessa käytettäviin aineisiin. Kuitenkin erityisesti prosesseissa, joissa käytetään kalliita materiaaleja ja lii-

tettyjä siruja halutaan testien jälkeen mahdollisesti korjata, välitaytteen on oltava jollakin tavalla irrotettavaa ja puhdistettavaa. Lisäksi ei ole syytä unohtaa välitaytteelle asetettavia sähköisiä vaatimuksia, joita ovat sähköinen eristävyys ja läpilyöntikestävyys sekä dielektrinen vakio. Näiden arvojen hyvyys perustuu useimmiten käytettävän materiaalin puhtauteen ja tarkat lukuarvot ovat erittäin sovelluskohtaisia. [1]

3.2. Prosessit kapillaarisen välitaytteen käytössä

Toimiakseen kapillaarinen välitayte on pystyttävä annostelemaan niin, että se täyttää sirun ja alustan välisen tilan täydellisesti. Välitayte dispensoidaan nestemäisenä sirun vierelle, josta se vetäytyy sirun alle materiaalien pintaenergioiden ansiosta. Annostelu suoritetaan ohuella neulalla ja neulan sijainti ei kokonaisuudessaan ole merkittävä tekijä välitayttämisen onnistumiselle. Pääpiirteittäin annostelu pitää suorittaa mahdollisimman lähelle sirun reunaa. Automatisoiduissa prosesseissa välitayte annostellaan useimmiten joko sirun yhdelle reunalle, jolloin vetäytyminen on hitainta, tai vaihtoehtoisesti L-muodossa, jolloin vetäytyminen tapahtuu nopeammin. Oleellisinta on se, ettei annostelukuvio peitä ilman pääsyä sirun alle, jolloin kapillaarista vetäytymistä ei pääse tapahtumaan. Välitaytteen vetäytymisaikaa sirun alle voidaan arvioida tarkastelemalla Leongin ja Schwiebertin virtausyhtälöä, joka on esitetty yhtälössä (3.1):

$$T = \frac{3\mu L^2}{[h\gamma \cos(\theta)]} \quad (3.1)$$

Yhtälössä (3.1):

T = aika [s]

μ = nestemäisen aineen viskositeetti [kg/ms]

L = virtausmatka tai sirun reunan pituus [m]

h = alustan ja sirun välisen tilan korkeus tai nystyn koko [m]

θ = kostutuskulma [°]

γ = nestemäisen ja kaasumaisen aineen

rajapinnan pintajännitys [kg/s]

Yhtälö (3.1) on yksinkertaistettu ensimmäisen kertaluvun virtausyhtälö, mutta siitä huomataan riittävällä tarkkuudella vetäytymisaikaan merkittävästi vaikuttavat välitaytteen ja liitoksen ominaisuudet, joiden perusteella annosteluprosessi voidaan konfiguroida mahdollisimman hyväksi. Lämpötila vaikuttaa kovettamattoman välitaytteen viskositeettiin, joten annosteluvaiheessa välitaytemateriaalin on suotuisaa olla mahdollisimman kylmää ja alustan sopivasti lämmitetty, jotta välitaytteen viskositeetti muuttuu lämpötilan vaikutuksesta suuremmaksi ja vetäytyminen sirun alle tapahtuu helpommin. Kuitenkin, mikäli alustan lämpötila annosteluvaiheessa on liian suuri, voi välitaytteellä tapahtua ennen aikaista geelilytymistä liian nopean lämpötilan nousun ja viskositeetin laskun seurauksena. Välitaytteen kovettaminen alkaa kuitenkin siinä vaiheessa, kun se on saatu

kapillaarisesti levitettyä sirun alle, joten geelityminen sopivan ajan kuluttua on toivottua. [1]

Välitäytteen kovetus tapahtuu altistamalla se riittäväksi aikaa riittävälle lämpötilalle, joka ei kuitenkaan ylitä juotenestyjen sulamispistettä. Lämpötila ja altistus aika määritellään materiaalin mukaan. Perinteisissä sovelluksilla kovetusprosessi kestää noin 1-2 tuntia 100-150 °C:ssa, joten se voi olla merkittävä pullonkaula suurivolyymisessa tuotannossa, jossa kuitenkin käytetään pääosin nopeasti kovettuvia välitäytteitä ja linjamuotoisia uuneja. Erityisen lämpöherkissä prosesseissa tai piirilevyn lasitransitioilämpötilan T_g ollessa alhainen voidaan käyttää ultravioletin avulla kovettavia välitäytteitä, jolloin prosessi voidaan suorittaa huoneenlämmössä. UV-prosessin eduksi voidaan laskea myös huomattavan nopea kovetus aika, noin 1-3 minuuttia. Yleisellä tasolla kovetusprosessien heikkoutena voidaan pitää mahdollista välitäytteen alikovettumista, jolloin sen sekä kosteudelta että termomekaanisilta jännityksiltä suojaava vaikutus jää huomattavasti pienemmäksi. [1]

3.3. Vaihtoehdot kapillaariselle välitäytteelle

Välitäytteen merkitys kääntösirujen luotettavuudelle on hyvin merkittävä käsiteltäessä juotteen tai isotrooppisen liiman avulla liitettäviä siruja. Perinteinen kapillaarinen välitäyte on nykyisessä tuotantoprosessissa helppo annostella, mutta uunikovetus aiheuttaa prosessissa viivettä. Anisotrooppista liimaa käytettäessä välitäytettä ei tarvita, sillä liiman polymeerimatriisi toimii liitoksen välitäytteenä. Anisotrooppisten liimojen käyttöä kääntösiruliitoksissa on tutkittu paljon RoHS-direktiivin ansiosta ja niitä on käsitelty enemmän kappaleessa 2.1.

Suoraan perinteiselle pintaliitostekniikkaan perustuvalla tuotantolinjalle Motorolan vuonna 1992 patentoima ennalta annosteltava välitäyte eli no-flow-välitäyte sopii erinomaisesti, sillä se annostellaan ennen sirun kohdistusta joko alustalle tai jo kiekkoalasella suoraan sirulle ja se kovetetaan samassa reflow-prosessissa kuin juotos tapahtuu. Tämä lyhentää kokonaisprosessin läpimenoaikaa ja toisaalta prosessissa pärjätään yksinkertaisemmalla annostelulaitteistolla kapillaaristen välitäytteiden käyttöön verrattuna; ennalta annosteltavat välitäytteet voidaan toimittaa esimerkiksi yksinkertaisessa filmimuodossa. Ennalta annosteltavat välitäytteet ovat pääosin epoksipohjaisia ja ne voivat sisältää juotosliitoksessa tarvittavan juoksuutteen. [37]

Ennalta annosteltaville välitäytteille voidaan lukea eduksi muun muassa prosessivuon yksinkertaistaminen ja tuotantoprosessin nopeuttaminen, edullisemmän tuotantovälineistön mahdollistaminen ja välitäytön varmempi onnistuminen. Lukuisista eduista huolimatta ennalta annosteltavien välitäytteiden käyttö ei ole ongelmaton, sillä ne myös haittaavat normaalia kääntösirun liitosprosessia. Ennalta annosteltavia välitäytteitä käyttäessä juotenestyjen itsekohdistus heikkenee, mikä heikentää prosessin saantoa.

Lisäksi joidenkin välitäytteiden kovetus vaatii erikoisen reflow-profiilin, mikä estää niiden hyödyntämisen normaalissa tuotannossa. Lisäksi, kuten taulukossa 3.1 on huomattu, ennalta annosteltavan välitäytteen lämpölaajenemiskerroin on huomattavasti huonommin yhteensopiva kääntösiruliitosprosessin kanssa kuin perinteiset välitäytteet, joka heikentää liitosten luotettavuutta. [1][7]

Paras mahdollinen hyöty välitäytteeltä saadaan, kun sen lämpölaajenemiskerroin on yhtä suuri kuin juotenystyjen lämpölaajenemiskerroin. Lämpölaajenemiskertoimen parantamiseksi ennalta annosteltavaan välitäytteeseen voidaan lisätä erityisiä partikkeleita, joiden avulla lämpölaajenemiskerrointa pystytään ohjaamaan parempaan suuntaan eli pienemmäksi. Voidaan siis olettaa, että mitä alhaisempi lämpölaajenemiskerroin välitäytteellä on, sitä suurempi osa sen tilavuudesta on täytepartikkeleita. Täytepartikkelit kuitenkin lisäävät välitäytteen viskositeettia, mikä hankaloittaa sen annostelua. Tämä saattaa aiheuttaa aukkoja ja epäyhtenäisyyttä välitäytekerroksessa. [37]

Tämän työn painopisteenä on uuden vaihtoehdon, paryleenipinnoitteen, soveltava käyttö kääntösirun välitäytteenä. Paryleenipinnoitteen etuja ja haittoja kääntösirun välitäytteenä käsitellään kappaleessa 4.5

4. SUOJAPINNOITTEET ELEKTRONIIKASSA

Monissa sovelluksissa elektroniikka altistuu useille ulkoisista olosuhteista johtuville tekijöille, jotka vaikuttavat vähintään epäsuorasti elektroniikan toimintaan ja erityisesti luotettavuuteen pidemmällä aikavälillä. Erityistä kestävyyttä ja luotettavuutta vaativissa olosuhteissa, kuten auto-, ilmailu-, avaruus- ja lääketieteellisissä sovelluksissa ulkoisten tekijöiden vaikutukset pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi koteloidulla laite hermeettiseen koteloon tai pinnoittamalla kriittiset osat mahdollisimman tiiviisti soveltuvilla materiaaleilla. Toisaalta esimerkiksi lääketieteellisissä sovelluksissa myös toiseen suuntaan eristäminen on tärkeää; implantoitavan elektronisen laitteen pitää olla ulkoiselta pinnaltaan kehon kanssa yhteensopiva.

Suojapinnoitteilla pyritään luomaan elektroniikalle mahdollisimman hermeettinen suoja eristämään elektroniikka ympäristöltään erityisesti korroosion, käsittelyn, vaikeiden ympäristöjen lämmön muutosten, kosteuden, ilman mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien sekä liuottimien vaikutuksilta [17][20]. Erityisesti miniatyrisoidussa elektroniikassa liitoksiin pääsevät epäpuhtaudet voivat aiheuttaa monia ongelmia. Epäpuhtauksista voi johtua esimerkiksi lämpölaajenemiskertoimien epäyhteensopivuudesta johtuvien viikaantumisten kertautumista sekä delaminaation mahdollisuuden kasvua lämpötilan muuttuessa [39].

Edellä mainittujen tekijöiden vaikutusta voidaan testata ja karakterisoida luotettavuuden näkökulmasta. On huomattavaa, että olosuhdetesteissä valittavia kuormitustekijöitä on paljon ja mikäli kosteuden lisäksi muutetaan myös lämpötilaa, niin entropia ja mahdollisuus peruuttamattomiin muutoksiin kasvavat; mikään polymeerimateriaali ei ole täydellisen hydrofiilinen vaan absorboi ja päästää lävitseen aina jonkin määrän kosteutta [30]. Kosteus voi päästä polymeeripinnoitteen läpi esimerkiksi sirun tai alustan pinnalle ja aiheuttaa esimerkiksi korroosiota tai oikosulkuja [3]. Lisäksi on huomioitava, että parhainkaan suojapinnoite ei suojaa esimerkiksi liuottimien aiheuttamalta korroosiolta, mikäli liuotinta on jäänyt käsittelyn jälkeen suojapinnoitteen alle [17].

4.1. Suojapinnoitteen tarkoitus

Suojapinnoitteen pääasiallisena tarkoituksena on suojata herkkää ja korkeaa luotettavuutta vaativaa elektroniikkaa ympäristön vaikutuksilta, sekä eristää elektroniikka sähköisesti ympäristöltään. Tyypillisesti ympäristön vaikutukset johtavat toimintahäiriöihin joko suoraan tai epäsuorasti korroosion kautta, mutta rikkoutumisille voidaan luetella myös muita häiriölähteitä.

4.1.1. Suojaaminen korroosiolta

Elektroniikassa korroosion merkitys vikaantumisten aiheuttajana on kasvanut hyvin suureksi ja toisaalta kehittyvillä suojapinnoitteilla korroosiolta suojautuminen on yhä tehokkaampaa ja edullisempaa. SFS-ISO-8044-standardin mukaan ”korroosio on metallin fysikaalis-kemiallinen reaktio ympäristönsä kanssa, mikä aiheuttaa muutoksia metallin ominaisuuksiin ja mikä usein voi johtaa metallin, sen ympäristön tai teknisen järjestelmän vaurioihin”. [10]

Korroosio ei ole merkittävää suhteellisen ilmankosteuden ollessa alle 40 %, mikä on kuitenkin mahdotonta esimerkiksi kannettavien laitteiden tapauksessa. Suojapinnoitteilla altistavaa kosteutta voidaan vähentää ja lopulta saavuttaa suojauksen taso, jolla korrodoituminen ei ole merkittävää laitteen käyttöolosuhteissa. Kosteuden lisäksi myös lämpö, epäpuhtaudet ja värinä voivat edistää korroosiota, ja oleellista on pohtia eri tekijöiden suhteellisia määriä korroosiomekanismeihin [10]. Kosteutta käsitellään kahden pääkäsitteen avulla, joita ovat suhteellinen kosteus ja absoluuttinen kosteus. Yleisesti voidaan määrittellä, että ilmakehän kosteus on suhteellista kosteutta ja absoluuttista kosteutta käytetään kemiallisessa ja fysikaalisessa tarkastelussa. Absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan vesihöyryn määrää kuutiossa ilmaa ja suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilman absoluuttista kosteutta verrattuna suurimpaan mahdolliseen määrään vesihöyryä ilmatilavuutta kohden samassa lämpötilassa. [30]

Korroosiomekanismien ja korroosion perisyiden ymmärtäminen on tärkeää suojapinnoitteiden käsittelyn ja korroosiokontrollin kannalta. Elektroniikan kannalta merkittäviä korroosiomekanismeja ovat kemiallinen korroosio ja galvaaninen korroosio. Metalliin tapahtuvaan kemialliseen korroosioon vaikuttaa metallin kemiallinen luonne sekä käyttöympäristö. Kemiallinen korroosio vaatii kosteutta, joten kosteuden pitäminen metallipinnan ulkopuolella esimerkiksi suojapinnoitteen avulla auttaa ehkäisemään sitä. Kemiallinen korroosio aiheuttaa monien metallien tapauksessa metallin pinnalle epäorgaanisen metallioksidikerroksen, joka kasaantuu kunnes metalli on käytännöllisesti katsoen kulunut kokonaan pois. Kemialliselta korroosiolta voidaan suojautua myös metallin pinnalle keinotekoisesti kasvatetulla oksidikerroksella, joka estää edellä mainitun mekanismin syntyminen. [17]

Galvaaninen eli sähkökemiallinen korroosio ilmenee metallien sähkökemiallisessa sarjassa eriarvoisten metallien välillä, jolloin toinen metalli muodostaa anodin ja toinen katodin ja niiden välille syntyy potentiaali, joka on sitä suurempi mitä kauempana materiaalit sarjassa ovat toisistaan. Myös galvaanisessa korroosiossa metallien väliaineeksi joutuvalla kosteudella tai muulla epäpuhtaudella on suuri merkitys korroosion etenemisessä. Elektronisissa laitteissa käytetään useita sähkökemiallisessa sarjassa eriarvoisia metalleja, joista esimerkkinä voidaan mainita nystynalusmetalloinnissa käytettävät kupari, nikkeli ja kulta, ja sirun liitännässä käytettävä epäjalo alumiini, joiden välinen gal-

vaaninen korroosio on erittäin mahdollinen mikäli ne pääsevät esimerkiksi kosteuden välityksellä kontaktiin toistensa kanssa. Alumiinikerros suojataan korroosion mahdollisuudesta johtuen hyvin, jotta kontaktia ei pääsisi käyttöolosuhteissa muodostumaan. [17]

Mikroelektroniikassa jo vähäisenkin korroosion merkitys voi olla sovellusten toiminnan kannalta fataalia, sillä pienessä mittakaavassa jo sirun johdemetallien vähäinen korrodoituminen aiheuttaa epäideaalisuuksia, kuten oikosulkuja tai avoimia piirejä. Kääntösiruliitosten tapauksessa korroosio kiihdyttää väsymistä, halkeamien etenemistä ja oksidikerroksen kasvua [29]. Suojapinnoitteilla metallipintoja pystytään suojaamaan esimerkiksi kloridi-ioneilta, joiden merkitys mikroelektroniikan korrodoitumisessa on suuri. Niitä on ympäristössä ja niitä muodostuu suuremmassa määrin esimerkiksi hartsiin kovetuksessa. Lisäksi kloridi-ioneja on erilaisissa juoksuotteissa ja muissa prosessikemikaaleissa, ja ne tunkeutuvat pinnoille erityisen helposti. [3]

4.1.2. Sähköinen eristäminen

Yhtenä suojapinnoitteen tärkeistä tehtävistä on pinnoitettavan laitteen eristäminen sähköisesti ympäristöltään, joten suojapinnoitteelta vaaditaan riittävää resistiivisyyttä läpilyöntijännitteiden varalta ja resistanssia virran kulun estämiseksi. Vaikka pinnoitemateriaalien resistanssit ovat usein erittäin korkeita, niitä käytetään usein sovelluksissa, joissa pienikin virta- tai jännitepiikki voi rikkoa suojattavan piirin. Sopivan pinnoitteen valinnassa onkin huomioitava sekä suojattavan kohteen toleranssit että suojapinnoitteen parametrit, joihin voidaan dielektrisyysvakion ja resistanssin lisäksi nimetä elektronikan perusyksiköistä konduktanssi ja kapasitanssi sekä teho- ja häviökerroin. [17]

4.1.3. Suojapinnoitteen muut tehtävät

Suojapinnoitteen tehtäviin voidaan lukea edellä mainittujen lisäksi myös suojaaminen käsittelyltä, hankaukselta, säteilyltä, liuottimilta ja muilta prosessikemikaaleilta sekä mikro-organismeilta. Mikroelektroniikassa on erittäin pieniä rakenteita, jotka rikkoutuvat herkästi varomattomassa käsittelyssä tai tärinän vaikutuksesta. Esimerkiksi ohut paryleenipinnoite parantaa lankaliitosten vetolujuutta moninkertaisesti. Käsittely ja tärinä toista materiaalia vasten voivat aiheuttaa hankausta, joka aiheuttaa kulumista materiaaleissa, mikäli materiaalien keskinäinen kitkakerroin on suuri. Hankauksen seurauksia voidaan ehkäistä korkean abraasioresistanssin omaavan suojapinnoitteen avulla. [17]

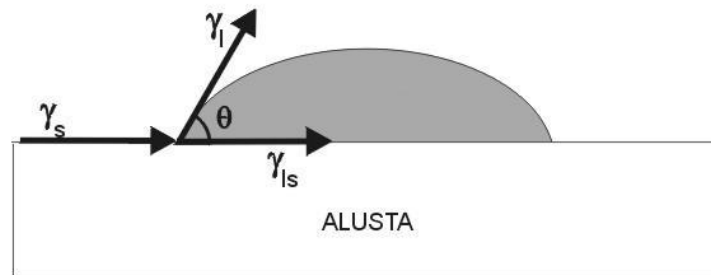
Suojapinnoitteen vaatimukset säteilysuojaksi korostuvat ultraviolettisäteilyä vastaan sekä avaruusteknisissä sovelluksissa, joissa laitteet altistuvat lisäksi avaruuden ionisoivalle taustasäteilylle. Ionisoiva taustasäteily aiheuttaa ajan kuluessa peruuttamattomia muutoksia sekä elektronisissa ominaisuuksissa että materiaaleissa. Orgaaniset suojapinnoitteet eivät suojele laitteita täydellisesti säteilyltä, mutta niiden ominaisuudet säteilylle altistuneena täytyy tietää, jotta niiden toiminta on ennustettavissa. Orgaanisten pinnoit-

teiden säteilysietävyyden hyvyyden mittana voidaan pitää niiden perusrakennetta; mitä aromaattisempi ja tiheämpi polymeerin rakenne on, sitä paremmin se sietää säteilyä. [17]

Elektronisia laitteita altistetaan usein pinnoituksen jälkeen erilaisille prosesseille, jossa niitä esimerkiksi puhdistetaan tai käsitellään liuottimilla tai kemikaaleilla. Kuten aiemmin tässä kappaleessa on huomattu, pinnoitteiden ominaisuuksien lisäksi myös vioittavien tekijöiden ominaisuudet on tunnettava hyvin, jotta vääranlaisilta reaktioilta pystytään välttymään. Sopivilla pinnoitteilla pystytään myös toteuttamaan kalliiden piirien yhteydessä tärkeää korjausta, kun tietyn pinnoitteen tiedetään heikentyvän tietyllä katalyytillä. Kemikaalien lisäksi suojapinnoitteilla voidaan suojautua mikro-organismeilta, kuten sieniltä, homeelta ja bakteereilta, jotka aiheuttavat materiaalien pilaantumista ja rappeutumista. Mikro-organismit voivat myös vaikuttaa käytettyyn suojapinnoitteeseen sitä heikentävästi, mutta toisaalta useat synteettiset pinnoitteet ovat mikro-organismeille ravintoarvoltaan heikkoja ja täten mikro-organismeja hylkiviä. [17]

4.2. Suojapinnoitteen vaatimukset

Kaikkien sovellusten suojapinnoitteiden tärkein ominaisuus on suojapinnoitteen mahdollisimman hyvä kiinnittyminen kohteeseensa eli adheesio. Adheesio tulee kestää koko pinnoitteen elinkaari asennuksesta tuotteen käytöstä poistoon asti niin sen käytön kuin varastoinninkin olosuhteissa. Adheesio on riippuvainen useista tekijöistä, kuitenkin sitä voidaan arvioida suojapinnoitteen tyyppin, prosessoinnin sekä suojattavan pinnan perusteella. Kuvassa ja yhtälössä 4.1 esitetyn mallin mukaisesti pinnoitteen kykyä kostuttaa pinta voidaan arvioida kostutuskulman θ avulla, joka on kulma pinnoitettavan tason ja nesteiden pinnan tangentin välillä. Täydellinen kostutus vaatii nollan asteen kulman kostutuksen huonontuen mentäessä kohti 180 astetta, jolloin kostutusta tai adheesiota ei pääse tapahtumaan. Tutkimuksissa on huomattu, että sekä pinnoitteen että pinnan pintaenergiat vaikuttavat kostutuskulmaan ja adheesiohyvyyteen. Yleisesti voidaan esittää, että riittävä adheesio pinnoitteelle saadaan silloin, kun pinnalla on korkea pintaenergia ja pinnoitteella matala. Kostutukseen vaikuttavia ominaisuuksia voidaan parantaa; pinnoitteen pintaenergiaa pystytään vähentämään esimerkiksi ohenteilla ja pintoja voidaan käsitellä kemiallisesti tai fysikaalisesti. [17]



Kuva 4.1. Kostutus on riippuvainen alustan ja nesteen pintajännityksistä sekä nesteen ja alustan välisestä kostutuskulmasta θ yhtälön 4.1 mukaisesti. Muokattu lähteestä [35].

$$\gamma_s = \gamma_{ls} + \gamma_l \cos \theta \quad (4.1)$$

Yhtälössä (4.1):
 γ_s = alustan pinnan pintajännitys [kg/s]
 γ_{ls} = nestemäisen aineen ja alustan rajapinnan pintajännitys [kg/s]
 γ_l = nestemäisen aineen pintajännitys
 θ = kostutuskulma [°]

Suojapinnoitteelta vaaditaan mahdollisimman hyvää kosteuseristystä. Orgaaninen suojapinnoite ei voi koskaan olla täysin hydrofiilinen, mutta ne kuitenkin tarjoavat useimmiten riittävän suojan ympäristön kosteudelta. Kuten aiemmassa kappaleessa on mainittu, kaikki polymeerikerrokset absorboivat itseensä jonkin määrän kosteutta, mikä johtuu polymeereille ominaisesta rakenteesta. Suojapinnoitteissa kosteuden tai kaasujen läpäisykykyä pinnoitteiden läpi kuvataan termeillä kosteuden absorptio ja permeabiliteetti. Kosteuden absorptiolla tarkoitetaan sitä tilavuusosuutta tietyssä kosteusmäärästä, joka imeytyy pinnoitemateriaaliin tietyssä lämpötilassa tietyn ajan kuluessa. Permeabiliteetti kuvaa sitä, kuinka hyvin aine johtaa kosteutta. Permeabiliteettia voidaan kuvata laskennallisena lukuna käyttämällä kosteushöyryn siirtymiskykyä - *MVTR* eli *Moisture vapor transmission rate*, jota voidaan arvioida yhtälön (4.2) mukaisesti:

$$MVTR = \frac{Ql}{at} \quad (4.2)$$

Yhtälössä (4.2):
 $MVTR$ = kosteushöyryn siirtymiskyky [g/cmh]
 Q = pinnalle levinnyt vesimäärä [g]
 l = pinnoitteen paksuus [cm]
 a = pinnoitteen pinta-ala [cm²]
 t = aika tunneissa [h]

Yhtälö (4.2) antaa mahdollisuuden arvioida pinnoitteen kosteuseritystä tuntematta sen materiaalisia ominaisuuksia tarkemmin. *MVTR*-arvoon vaikuttavatkin esimerkiksi polymeerin tyyppi ja materiaali, kovettumisaste sekä molekyylinen rakenne. Permeabiliteettia voidaan testata standardoidusti esimerkiksi *ASTM E96-80*-standardiin perustuen. [17]

Edellä mainittujen päävaatimusten lisäksi suojapinnoitteelta vaaditaan sovelluskohtaisesti vaihtelevia fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Riittävän ympäristöstä eristämisen lisäksi myös sähköinen eristävyys on tärkeä suojapinnoitteen ominaisuus; hyvä suojapinnoite suojaa myös elektrostaattisilta ilmiöiltä sekä parantaa laitteen sähkömagneettista yhteensopivuutta. Termisiltä ominaisuuksiltaan, kuten lämpölaajenemiskertoimeltaan, suojapinnoitteen on oltava ympäristönsä kanssa yhteensopiva. Muita suojapinnoitteelta vaadittavia sovelluskohtaisesti muuttuvia ominaisuuksia ovat esimerkiksi pinnoitteen kovuus ja kulutuksenkesto, korkea puhtauden tasoa sekä lämmön ja kaasujen sietokykyä. [17]

4.3. Sopivan suojapinnoitteen valinta

Erilaisia elektroniikan suojauksessa käytettäviä polymeeripinnoitemateriaaleja on paljon, joista yleisimpinä voidaan mainita kovat ja erittäin tarttuvat akryyli-, epoksi- ja uretaanimateriaalit sekä joustavammat silikoni- ja paryleenimateriaalit [39]. Paryleenipinnoitteita ja höyryvaporisaatioprosessia käsitellään syvällisemmin kappaleessa 4.4. Sovellukselle parhaimmin sopivan suojapinnoitteen valinta vaatii käyttöympäristön määrittelyä hyvinkin syvällisesti ja on usein kompromissi pinnoitteen eri vaatimusten välillä, joista tärkeimpiä käsiteltiin edellisessä kappaleessa.

Pinnoitemateriaalit paryleenia lukuunottamatta ovat historiallisesti sisältäneet liuottimia, mutta ympäristötietoisuuden kasvaessa liuottimista on pystytty luopumaan pinnoitteiden prosessoinnissa, mikä on lisäksi edistänyt orgaanisten pinnoitteiden kehitystä ja laajentanut pinnoitteiden mahdollisuuksia erityisesti mikroelektroniikan sovelluksissa [17]. Sopivan pinnoitemateriaalin valintaan vaikuttavat muun muassa pinnoitteelta halutut sovellusriippuvaiset termiset, mekaaniset, sähköiset ja fysikaalis-kemialliset ominaisuudet, kuten pinnoitteen hermeettisyys ja adheesio. Lisäksi pinnoitteelta voidaan perustellusti vaatia myös esimerkiksi helppoa käsiteltävyyttä ja haurastumattomuutta. [34]

Sopivan pinnoitteen valintaan liittyy myös muita valmistuksellisia seikkoja, joita ei ole syytä sivuuttaa. Ristikontaminaatio tarkoittaa pienten rakenneosien kulkeutumista pinnasta toiseen suoraan tai välillisesti, mikä voi aiheuttaa esimerkiksi pinnoitteen adheesion tai eheyden heikkenemistä. Ristikontaminaation merkitys nykyaikaisissa suojapinnoiteprosesseissa on kohtuullisen vähäistä. Valmistuksen turvallisuuden kannalta huomioitavia seikkoja ovat esimerkiksi suojapinnoitteen prosessoinnissa käytettävien tai syntyvien räjähtävien, palavien tai myrkyllisten aineiden syntymisen huomioiminen

tuotannossa vaaratilanteiden minimoimiseksi. Yksi tärkeimmistä valmistuksellisista seikoista on valmiin pinnan tarkastaminen, mikä on hankalaa pinnoitteiden ohuesta luonteesta ja läpinäkyvyydestä johtuen. Suojapinnoitteen tarkistus voidaan tehdä joko visuaalisesti tai paksuutta tarkastelemalla. Pinnoitteen paksuuden tarkastelu tuhoamattomasti jopa alle mikrometrin paksuiselle pinnoitteelle on erittäin haastavaa; toisaalta automaattinen prosessi voidaan säätää tuottamaan sopivanpaksuista suojapinnoitetta. Visuaalisen tarkastuksen helpottamiseksi pinnoitemateriaaliin voidaan lisätä pieniä määriä indikaattoria, jolloin suojapinnoitteen laatu ja kattavuus voidaan todeta esimerkiksi ultraviolettivalossa. [17]

Eri suojapinnoitteita voidaan valmistaa eri tavoin joko automaattisesti tai puoliautomaattisesti, mikä mahdollistaa useimpien pinnoitesovellusten lisäämisen tuotantolinjalle. Pinnoitteen valmistelu on nelivaiheinen prosessi ja sisältää alustan puhtauden varmistamisen, liitännöiden peittämisen, pinnoitemateriaalin annostelun ja lopulta sen kovettamisen sekä maskien poistamisen. Pinnoitteet voidaan annostella kastamalla, atomisoidulla sprayllä, pyyhkäisemällä tai pinnoiteaallon tavoin, jota voidaan verrata aaltojuotokseen. Paryleenipinnoite kasvatetaan höyryvaporisaatioprosessissa, jota käsitellään kappaleessa 4.4. [17][20]

Automatisoiduissa pinnoitustekniikoissa suositetaan selektiivisiä pinnoitustekniikoita, jolloin suojamaskaus voi olla vähäisempi tai sitä ei tarvita ollenkaan. Pinnoitteen valinnan kriteerinä voidaan myös käyttää pinnoitteen korjattavuutta, sillä esimerkiksi epoksi-pinnoitteet ovat pääosin niin lujia, että niiden poistaminen rikkoo myös piirilevyn. Akryyli- ja uretaanipinnoitteiden korjaus voidaan suorittaa esimerkiksi mikrohionnan tai abraasion avulla. [20]

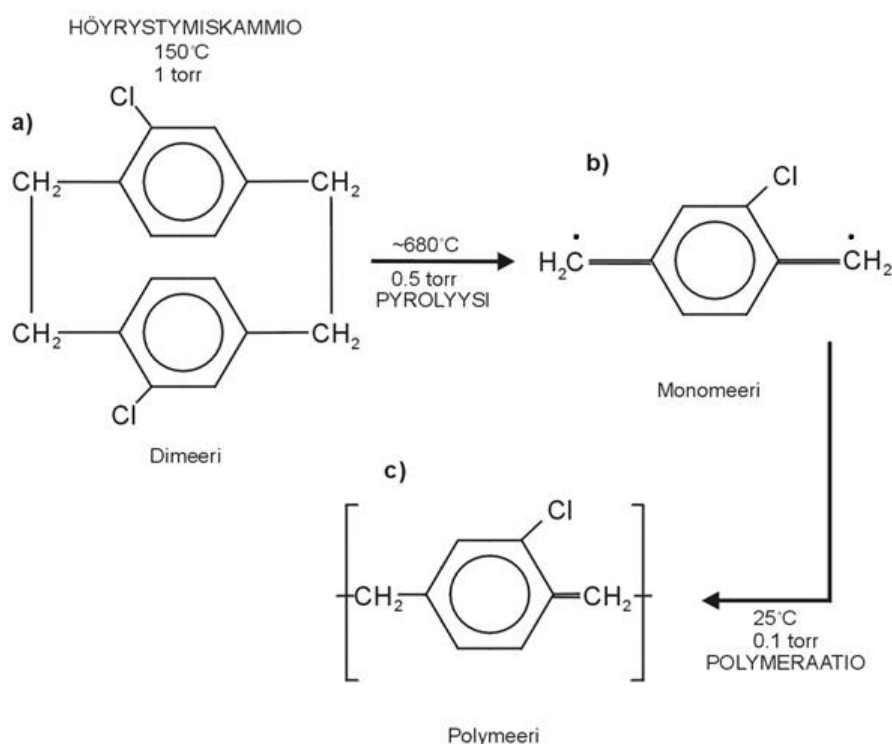
4.4. Paryleeni C ja höyryvaporisaatioprosessi

Paryleeni polymeroidaan jauhemaisista dimeereistä, para-ksyleeneistä kemiallisessa tyhjiöpinnoitusprosessissa eli höyryvaporisaatioprosessissa. Tyhjiöpinnoitusominaisuuksista johtuen paryleenista voidaan muodostaa hallitusti yhtenäisiä suojakalvoja, jotka eivät sisällä pieniäkään reikiä, ja joiden paksuus vaihtelee alle mikrometrin tasolta useihin kymmeneen mikrometreihin, tyypillisimpien kalvojen ollessa joidenkin mikrometrien paksuisia. [2][28]

Elektroniikan suojapinnoitteelle ja sen valinnalle on määritelty vaatimuksia aiemmissa kappaleissa. Paryleenin tapauksessa moni vaadituista ominaisuuksista täyttyy. Paryleenista tehty suojakalvo pystytään määrittelemään dimeerin määrää arvioimalla suhteellisen tarkasti ennalta ja prosessina höyryvaporisaatio on yksinkertainen. Lisäksi eheä pinnoite voidaan muodostaa jo yhdellä pinnoituskerralla paryleenin hyvien tunkeutumisominaisuuksien vuoksi, mikä johtuu käytettävästä höyryvaporisaatioprosessista.

Painovoimaan tai pintajännitykseen perustuviin annostelutapoihin verrattuna paryleenipinnoitteen epäonnistumisen vaara on pienempi. [25][28]

Kaupallisissa sovelluksissa käytetään pääosin neljää paryleenimateriaalia, joista tässä työssä käytettävä paryleeni C otetaan tarkempaan käsittelyyn. Paryleeni C eli polykloro(para-ksyleeni) koostuu kemialliselta rakenteeltaan ”bentseenirenkaasta, kahdessa para-asennossa sijaitsevasta CH₂-ryhmästä sekä yhdestä klooriatomista” [28]. Lähtöaineena toimii dikloro-di(para-ksyleeni)-dimeeri. Paryleeni C on ominaisuuksiltaan erittäin sopiva elektroniikan pinnoitukseen, sillä se on sähköisiltä ominaisuuksiltaan hyvä eriste ja sähköisesti stabiili sekä fysikaalisilta ominaisuuksiltaan erittäin käytännöllinen. [13][25][28]



Kuva 4.2. Paryleenin muodostuminen yhtenäiseksi polymeeripinnaksi paryleenipinnoitusprosessissa. Muokattu lähteestä [17].

Höyryvaporisaatioprosessissa on kolme päävaihetta, jotka toteutetaan tyhjiössä. Paryleenipinnoitusprosessin päävaiheet ja paryleenin kemiallinen polymerointiprosessi on havainnollistettu kuvassa 4.2. Ensimmäinen vaihe tapahtuu pinnoituslaitteen höyrystyskammiossa, jossa dimeeriä lämmitetään 150 °C:ssa, jolloin sen olomuoto muuttuu kiinteästä pulverimaisesta rakenteesta suoraan höyryksi eli se sublimoituu. Sublimoituminen tapahtuu 1 torr:n eli noin 133 Pa:n paineessa ja paineen kasvaessa kaasu siirtyy prosessin seuraavaan vaiheeseen eli pyrolyysivaiheeseen. [17][25][28]

Pyrolyysiyksikkössä höyryä lämmitetään 650-680 °C:een 0,1-0,5 torr:n eli noin 13-66 Pa:n paineessa. Riittävässä lämpötilassa dimeerimateriaalin molekyylinen rakenne muuttuu niin, että materiaali hajoaa kahdeksi reaktiiviseksi di-radikaalimonomeeriksi. Rakenteen muutosta havainnollistaa kuvan 4.2 b-kohta. [17][25][28]

Höyryvaporisaation viimeinen vaihe on polymeraatio. Pinnoituskammiossa on pyrolyysiyksikköä huomattavasti alhaisempi lämpötila, joka eroaa vain muutaman asteen huoneenlämmöstä sekä alhainen, noin 0,1 torr:n eli noin 13 Pa:n paine. Kaasumaisena olevat di-radikaalimonomeerit siirtyvät pyrolyysiyksiköstä pinnoituskammioon, jossa nämä aktiiviset kuvan 4.2 c-kohdan mukaiset molekyylit muodostavat pitkäketjuisen polymeerikerroksen, jolla on korkea molekyylipaino. Koska pinnoituskammio on huoneenlämpöinen, prosessi soveltuu myös erittäin lämpötilaherkkien järjestelmien pinnoitukseen. [17][25][28]

4.5. Paryleenipinnoite välitäytteenä

Kapillaariset epoksivälitäytteet ovat kovettuaan hyvin adhesiivisia, mikä vaikeuttaa liitoksen korjattavuutta tai tekee sen täysin mahdottomaksi itse sirua rikkomatta. Lisäksi erityisissä korkeaa luotettavuutta vaativissa sovelluksissa paryleenin käyttö parantaa laitteen suojausta ympäristön vaikutuksilta. Korkean luotettavuuden järjestelmissä myös sirut voivat olla huomattavan kalliita tai tavoite on integroida mahdollisimman paljon elektroniikkaa pieneen tilaan, kuten implantoitavissa laitteissa. Lääkintälaitteiksi luokiteltavat tuotteet, kuten implantoitavat laitteet, ovat erittäin tarkasti säädelyjä viranomaisten taholta. Koska paryleenin käyttö lääkintälaitteissa on hyväksyttyä, sitä voidaan käyttää vaikeissa ympäristöissä esimerkiksi monisirumoduleiden pinnoituksessa ja välitättämisessä. Tällöin kokoonpanojen kustannukset ovat huomattavia, jolloin esimerkiksi rikkoutuneen liitoksen tapahtuessa sirun uudelleenkäyttö on vielä mielekästä.

Erilaisia välitäytteille vaadittavia ominaisuuksia käsiteltiin kapillaaristen välitäytteiden yhteydessä taulukossa 3.1, jossa vertailtiin paryleenin ominaisuuksia aiempiin kapillaarisen välitäytteen ominaisuuksiin yhdessä orgaanisen alustan, sirun ja erilaisten nystyjen materiaaliparametrien kanssa. Yleisesti luotettavuustutkimuksissa on havaittu, että luotettavuus on parhaimmillaan silloin, kun välitäytteen lämpölaajenemiskerroin on yhtä suuri kuin juotenystyjen lämpölaajenemiskerroin. Paryleeni C:n lämpölaajenemiskerroin on kirjallisuuden mukaan samaa luokkaa erilaisten kapillaaristen välitäytteiden kanssa, joten paryleeni voi siltä osin soveltua välitäytteeksi.

Paryleenipinnoite asennetaan kappaleessa 4.4 käsitellyn höyryvaporisaatioprosessin avulla, jolloin sillä on ainutlaatuinen kyky tunkeutua pieniin väleihin, kuten alustan ja puolijohdesirun väliseen tilaan, johon muuten asennettaisiin välitäyttemateriaalia kapillaarista ilmiötä hyödyntämällä. Koska paryleeni asennetaan tyhjiössä, koko laite pinnoituu, joten laitteen ulkoiset kontaktit on suojattava pinnoitteelta. Paryleenipinnoite on

kuitenkin hyvä suoja muun muassa korroosiota vastaan muillekin järjestelmän osille kuin juoteliitoksille, joten pinnoittaminen on luotettavuuden näkökulmasta aina perusteltua.

Paryleenipinnoitteen käyttöä välitäytteenä ei ole juurikaan tutkittu, tosin yksittäisiä viitteitä sen käytöstä löytyy eri julkaisuista. Useimmiten perusteena käytetään tällöin tarvetta siruliitosten korjattavuudelle kalliita siruja käytettäessä, jolloin epoksivälitäytettä ei voida käyttää ja paryleeni pystytään puhdistamaan poistettavasta sirusta, vaikka prosessi onkin työläs ja kallis. Täten paryleenin ominaisuuksista välitäytteenä ei ole olemassa juurikaan valmista tutkimustietoa suuntaa antavien viitetulosten lisäksi. Eräässä tutkimuksessa (Tong et al. 1992) on todettu paryleenipinnoitteen parantavan keraamialustalle liitettävien kääntösirujen elinikää perustuen jännityksen leviämiseen kääntösirun alle ja nystyille tunkeutuneeseen paryleenipinnoitteeseen, minkä perusteella paryleenin vaikutusta orgaaniselle alustalle liitettyyn kääntösiruun ei voida osoittaa. [33]

Suryanarayana et al. tutkivat vuonna 1995 paryleenipinnoitteen käyttöä kääntösirujen välitäytteenä osana tutkimustaan kääntösiruliitosten korjattavuudesta. Tutkimuksen lähtökohtana oli välitäytteen rajoittuneisuus vain edullisissa sovelluksissa, jolloin epäonnistuneiden liitosten korjattavuus ei ole taloudellisesti järkevää. Tutkimuksessa pystyttiin osoittamaan paryleenin tunkeutuminen kääntösirun alle ja nystyjen ympärille. Samalla paryleenipinnoitetulle ja välitäytetyille C4-kääntösirulle tehtiin lämpösyklitestaus, jossa havaittiin noin 2-3-kertainen parannus verrattuna välitäytteettömään kääntösiruun keraamialustalla. Tutkimuksessa tätä tulosta ei kuitenkaan pidetty merkittävänä, vaan tutkimusta jatkettiin lisäämällä välitäytteeksi paryleenin lisäksi kapillaarinen epoksivälitäyte, joiden yhteisvaikutus luotettavuuteen havaittiin noin 5-10 kertaa paremmaksi kuin pelkällä epoksivälitäytteellä. Lisäksi huomattiin, että epoksivälitäytteen poistaminen helpottui, sillä paryleeni muodosti poistettavan kerroksen, jonka päälle epoksivälitäyte asettui. [31]

4.6. Paryleeni-välitäytteen edut ja haitat epoksiin verrattuna

Paryleenipinnoite asennetaan höyryvaporisaatioprosessissa, jonka ominaisuuksien avulla paryleeni tunkeutuu herkästi pieniin väleihin kuten kääntösirun ja alustan väliin. Paryleenin käytöstä kääntösiruliitosten välitäytteenä on julkaistu joitakin tutkimuksia (Suryanarayana et al. 1995, Tong et al. 1992), mutta tulokset eivät kerro kaikkea paryleenin tunkeutumisesta sirujen alle, koesarjojen nystykoosta eli sirun ja alustan välisestä etäisyydestä, nystyjen määrästä ja muista asiaan vaikuttavista tekijöistä. Mikäli paryleenin tunkeutumiselle olisi tunnettavissa matemaattinen yhtälö kuten kapillaarisen välitäytteen tunkeutumiselle, pinnoitteen ja välitäytteen onnistumisen arviointi ennakkoon olisi huomattavasti helpompaa.

Paryleenipinnoite suojaa kääntösiruliitosten herkkiä materiaaleja ympäristöltä erittäin hyvin. Vaikka termomekaanisista ominaisuuksista johtuvat luotettavuusongelmat halutaisiin ratkaista käyttämällä perinteisiä epoksivälitähäyteitä, paryleenin käyttö tämän lisäksi helpottaa kokoonpanon mahdollista korjausta kustannuksiltaan korkeissa ratkaisuissa.

Epoksivälitähäyteet ovat suhteellisen korkeasta tiiviydestään huolimatta hieman hauraita ja pystyvät absorboimaan joitakin määriä nestettä, mikä voi aiheuttaa ongelmia välitähäyteen ominaisuuksien epävakautuessa. Esimerkiksi epoksiin absorboitunut neste voi lämmitessään turvota nopeasti ja aiheuttaa lämpöpaukahtelua, joka saattaa rikkoa koko liitoksen [1]. Välitähäyten vikaantumismekanismija on käsittely kappaleessa 2.4.

Paryleenipinnoittaminen on prosessina monimutkainen ja pitkäkestoinen, ja paryleenidimeeri on materiaalina suhteellisen kallista, joten paryleenin käyttö kuluttajaelektronikan halvemman luokan suurivolyymisissa tuotteissa on erittäin kyseenalaista. Mikäli laite on tarkoitus joka tapauksessa suojapinnoittaa paryleenia käyttämällä, niin tässä tapauksessa prosessissa säästytään ylimääräiseltä välitähäyten lisäämiseltä. Korkeaa luotettavuutta vaativissa sovelluksissa kapillaaristen välitähäyten käyttö on kuitenkin perusteltua huolimatta paryleenipinnoitteesta, sillä niiden vaikutus luotettavuuteen on paljon tutkittua ja hyvin tunnettua. Perinteiset epoksivälitähäyten prosessit ovat hyvin tunnettuja ja toisaalta pullonkauloja aiheuttavat kapillaarinen annostelu sekä uunissa kovetus pystytään korvaamaan esimerkiksi vielä kehittyvillä ennalta annosteltavilla välitähäyteillä ja nopealla ultraviolettikovetuksella.

Paryleenin lämmönjohtavuus on epoksivälitähäytettä huonompi, mikä aiheuttaa ongelmia erityisesti hyvää jäädytystä vaativissa prosessorisovelluksissa, sillä laitteen korkea lämpötila on myös luotettavuuskysymys. Kaiken kaikkiaan paryleenipinnoitteen käyttöä kääntösiruliitosten välitähäyteenä ei ole vielä tutkittu tarpeeksi ja prosessia kehitetty sellaiseksi, että teknologian käyttö yleistyisi elektroniikkateollisuudessa joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta lähivuosina.

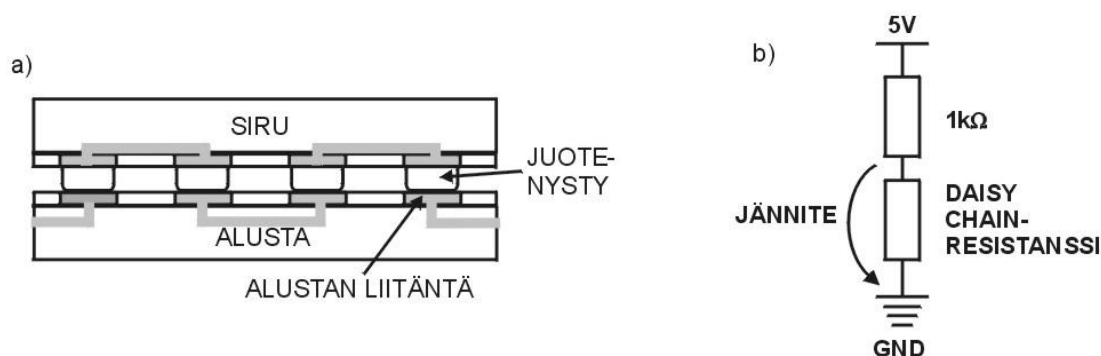
5. KOKEELLINEN OSUUS

Koesarjat valmistettiin TTY:n Elektroniikan laitoksen puhdastilassa ja pakkaustekniikan laboratoriossa ja ne muodostuivat ohuelle FR-4-alustalle juoteliitetyistä testisiruista. Rakenteita välitetyttiin kolmella eri tavalla ja koesarjat ajettiin lämpösyklitestissa daisy chain-ketjurakenteen resistanssia tarkkaillen. Näin testikappaleiden tarkka vikaantumishetki saatiin tietoon ja tuloksia voitiin analysoida. Poikkileikkausnäytteitä tutkimalla saatiin määriteltyä myös paryleenipinnoitetun sarjan tapauksessa paryleenin tunkeutuminen sirun alle, jotta sen toiminnasta voitaisiin tehdä mahdollisimman hyviä johtopäätöksiä.

5.1. Testisiru ja alusta

Käytetyn testisirun on suunnitellut diplomityönään TTY:n Elektroniikan laitokselle Päivi Karjalainen vuonna 2002 osana Tekniikan edistämiskeskuksen Elektroniikan miniatyrisointi-projektia (*TEKES/ELMO*) ja sen on valmistanut Micro Analog Systems Oy Espoossa prosessissa, joka mahdollistaa kahden metallikerroksen käytön sekä $1,75\mu\text{m}$ viivanleveyden. Testisirut ovat fyysiseltä kooltaan $2800 \times 8200\mu\text{m}^2$ ja niiden substraattimateriaalina on käytetty N-tyyppistä piitä. Testisirun reunoilla on rivissä 142 neliönmuotoista liitääntä, jotka ovat diagonaaliselta kooltaan $100\mu\text{m}$ ja sijoitettu $150\text{...}200\mu\text{m}$ väleille toisistaan. Käytetyn sirun liitännöille on jätetty halkaisijaltaan $80\mu\text{m}$ passivoitikerros, jolle on kasvatettu tina-lyijy-nystyjä, jotka ovat korkeudeltaan noin $80\mu\text{m}$. [10]

Testisirulle suunniteltu alusta on valmistettu kaksikerroksiselle $400\mu\text{m}$ paksulle FR-4-levylle, jossa johdinmateriaalina on käytetty nikkeli-kulta-pinnoitteella päällystettyä kuparia. Alustan liitääntäkoko sirua vastaaville liitännöille on $100\mu\text{m}$. Diplomityössään Päivi Karjalainen suunnitteli myös kolme muuta testisirua kolmiulotteisen pakkaustekniikan rakenteiden testaamista. Testialustakokonaisuus on kooltaan $520 \times 1180\text{mm}^2$ ja sille voidaan liittää yhteensä 18 sirua.



Kuva 5.1. a) Periaatekuva daisy chain-ketjusta. **b)** Periaatekuva olosuhdetestauksen aikaisesta daisy chain-resistanssin yli olevan jännitteen mittaamisesta.

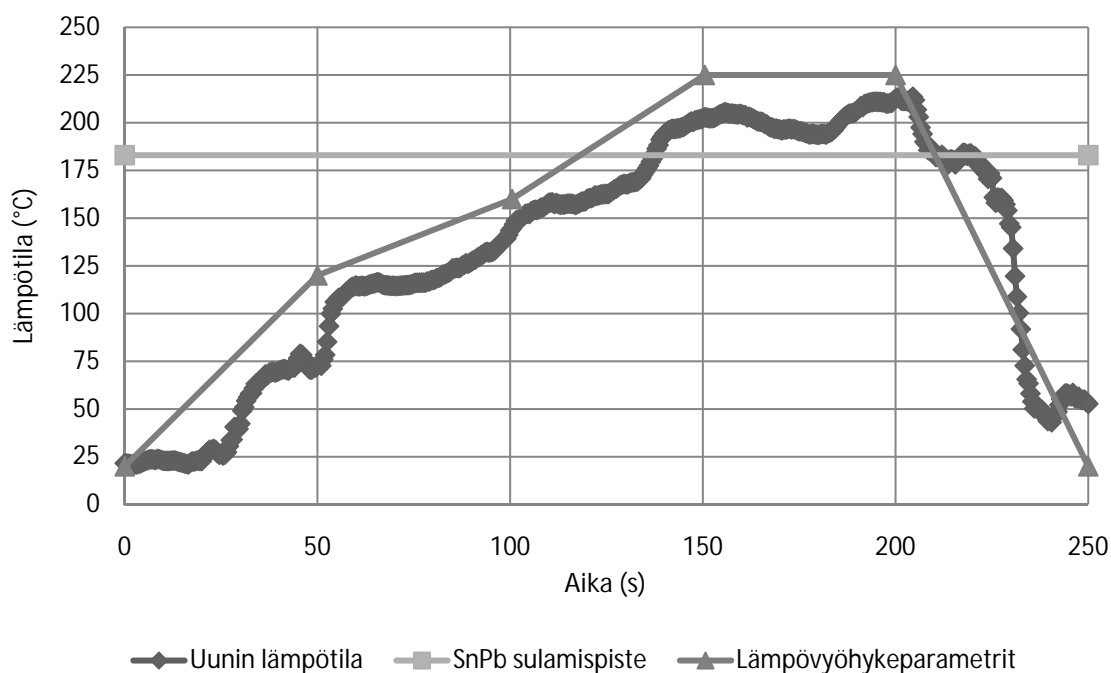
Testisiruun ja alustaan on suunniteltu daisy chain–ketjurakenne, jolla tarkoitetaan testisirun reunan liitännöitä yhdistävää rakennetta. Rakenteessa joka toiset peräkkäiset liitännät on yhdistetty piisirulla ja joka toiset alustalla, jolloin onnistuneen liitoksen tapauksessa saadaan aikaan ketju, jolla on tunnettu resistanssi. Daisy chain-ketjurakenne on esitetty periaatteellisella tasolla kuvan 5.1 a-kohdassa. Olosuhdetestauksen aikainen mittausjärjestely on esitetty kuvan 5.1 b-kohdassa. Käytettävä käyttöjännite on 5V tasajännite, ja mitattavan daisy chainin edessä on 1 kilo-ohmin tarkkuusvastus. Ketjun resistanssi aiheuttaa jännitehäviön, jota seuraamalla voidaan tutkia liitoksien kestävyyttä esimerkiksi olosuhdetestauksen aikana. Ketjua voidaan tutkia myös paloittain, jolloin liitoksen rikkoutuminen voidaan paikantaa jo sykli vaiheessa paremmin; erityisesti sirun kulmat ovat herkkiä vikaantumiselle. [11][21]

5.2. Liitosprosessi ja välitäytäminen

Testisirut kohdistettiin niille valmistetulle FR-4-alustalle kääntösirujen liittämiseen tarkoitetulla manuaalisella Fineplacer–työasemalla, joka sallii noin 5µm kohdistustarkkuuden. Testisirun nystyjen ja alustan liitännöiden mittakaava on kymmenien mikrometrien luokkaa, joten liittäminen kyseisellä työasemalla todettiin mahdolliseksi. Fineplacerin ominaisuuksiin kuuluu lämmitettävät kohdistuspää ja alusta, mikä mahdollistaa reflow-profiilin ajon kohdistusprosessin yhteydessä, mutta reflow päätettiin tehdä erillisellä käytettävissä olevalla Breeze-merkkisellä reflow-uunilla.

Juotosliitännöiden valmistamiseksi kustutusta varten käytettiin erillistä tahmeaa juoksu-tetta. Lisäksi juoksutteen avulla sirut saatiin tarttumaan alustaan ja siirrettyä liitos-työasemalta eri tilassa sijainneeseen uuniin. Prosessi, joka perustuu neljän lämpöalueen profiiliin, säädettiin testisirun tina-lyijy-nystyille sopivaksi lämpötila-anturin ja tiedonkerääjän avulla. Reflow-prosessissa käytetty lämpötilaprofiili sekä kuumakonvektio-uunille syötetyt lämpövyöhykeparametrit ja tina-lyijy-juotteen sulamispiste on esitetty kuvassa 5.2. Onnistuneessa liitoksessa testisirun daisy chain -ketjurakenteen resistans-

siksi todettiin noin 4 ohmia, joten liitoksen onnistuminen pystyttiin toteamaan yleismitarin avulla.



Kuva 5.2. Liitosprosessissa käytetty reflow-profiili lämpötilaloggerilla mitattuna.

Huomattavaa käytetyssä testisirussa on liitosnystyjen pienuus, suuri määrä ja tiheys, jotka vaikuttavat osaltaan paljon liitosprosessissa vaadittavaan tarkkuuteen sekä paryleenin vetäytymiseen sirun alle. Koesarjoista valmistettiin näytteitä, jotka varmistavat prosessissa tapahtuneet ongelmat. Näytteiden perusteella pystyttiin tutkimuksessa tekemään johtopäätöksiä paryleenin tunkeutumisen suhteen, jota käsitellään kappaleessa 5.4.

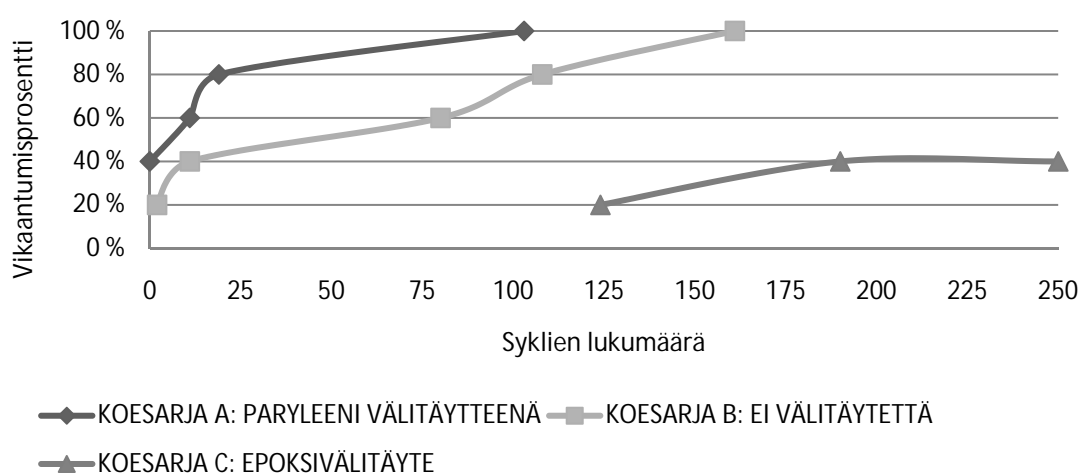
Taulukko 5.1. Esimerkkiarvoja koesarjoissa käytettyjen välitäyttemateriaalien ominaisuuksista verrattuna alustan, sirun ja nystyjen ominaisuuksiin.

	Kimmokerroin Gpa	CTE ppm/°C	Lämmönjohtavuus W/m K
<i>FR-4-piirilevy</i>	20	15	15
<i>Pii</i>	110	3	125
<i>Juotenysty (SnPb)</i>	50	25	50
<i>Paryleeni C</i>	3	35	0,2
<i>Kapillaarinen välitäyte</i>	3	35	0,2

Koesarjoissa käytettyjen välitäytteen ominaisuuksia verrattuna alustan ja sirun ominaisuuksiin on lueteltu taulukkoon 5.1. Koesarjat A, B ja C valmistettiin käyttäen samoja materiaaleja, jotta vertailtavuus eri välitäytteen välillä pystyttiin saavuttamaan. Koesarja A välitäytettiin paryleenilla. Referenssikoesarja B valmistettiin ilman välitäytettä ja sarja C käyttämällä EPO-TEK U300-2-epoksivälitäytettä, jonka datalehti on liitteenä 1. Kapillaarinen välitäyte annosteltiin käsin liitetyn sirun toiselle pitkälle reunalle, josta se vetäytyi sirun alle. Välitäytettä kovetettiin datalehden ohjeen mukaisesti 150 asteessa tunnin ajan. Koesarjaan A pinnoitettiin paryleenia Elektroniiikan laitoksen omistamalla ja Para Tech Coating Inc:n valmistamalla Lab Top Parylene Deposition System -höyryvaporisaatiolaitteistolla. Pinnoitteeksi valittiin paryleeni C, sillä sitä käytetään paljon kriittisten elektronisten laitteiden pinnoittamiseen [28]. Prosessissa käytettiin dimeeriä 19g, josta lasilevyn pinnalle saatiin 17-18 μ m paksuinen paryleenikalvo.

5.3. Lämpösyklitestin tulokset

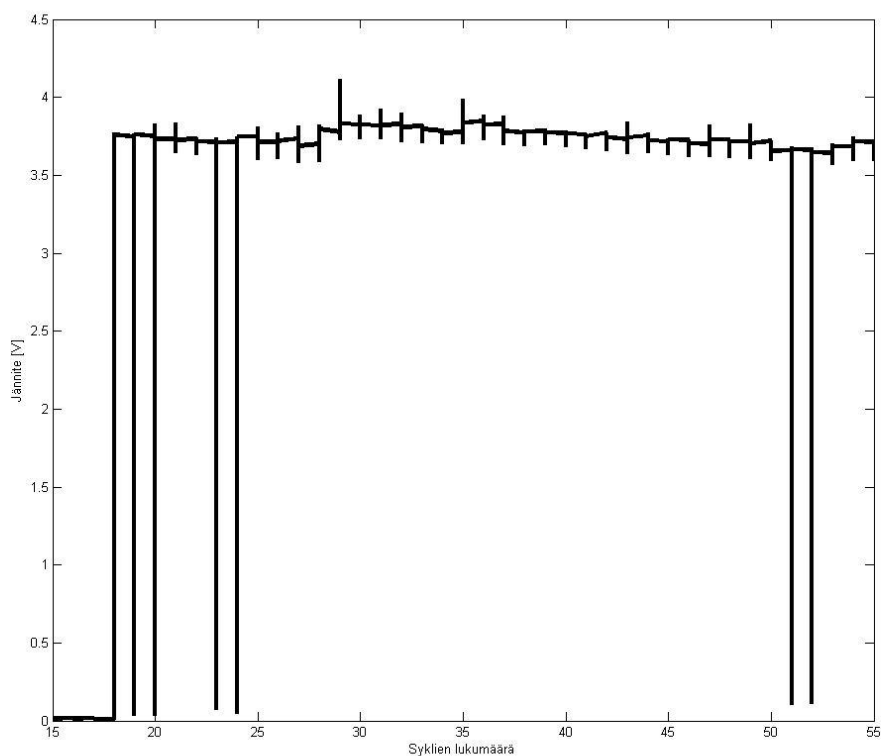
Valmiit koesarjat asetettiin Elektroniiikan laitoksen olosuhdelaboratorion Espec-lämpösyklikaappiin. Lämpösyklitestissä koesarjat altistettiin -40 - +125 asteen sykliin. Syklissä yhtä ääriämpötilaa ylläpidettiin 14 minuuttia kerrallaan, jonka jälkeen lämpötila vaihtui minuutin aikana toiseen ääriämpötilaan 14 minuutiksi. Syklin kokonaisajaksi saadaan täten 30 minuuttia ja niitä ajettiin testin aikana 250 kappaletta. Näytteistä mitattiin reaaliaikaisesti yksittäisten näytteiden daisy chain-ketjurakenteen resistanssin yli olevaa jännitettä. Mittauslaitteisto koostui kiinteästä 5V tasajännitelähteestä ja 1 kilo-ohmin tarkkuusetuvastuksesta, joka on sarjassa mitattavan daisy chain-ketjurakenteen kanssa; mittauslaitteisto on esitelty kuvassa 5.1. Rikkoutumistilanteessa ketju katkeaa ja mitattavan ketjun yli oleva jännite hyppää käyttöjännitteeseen.



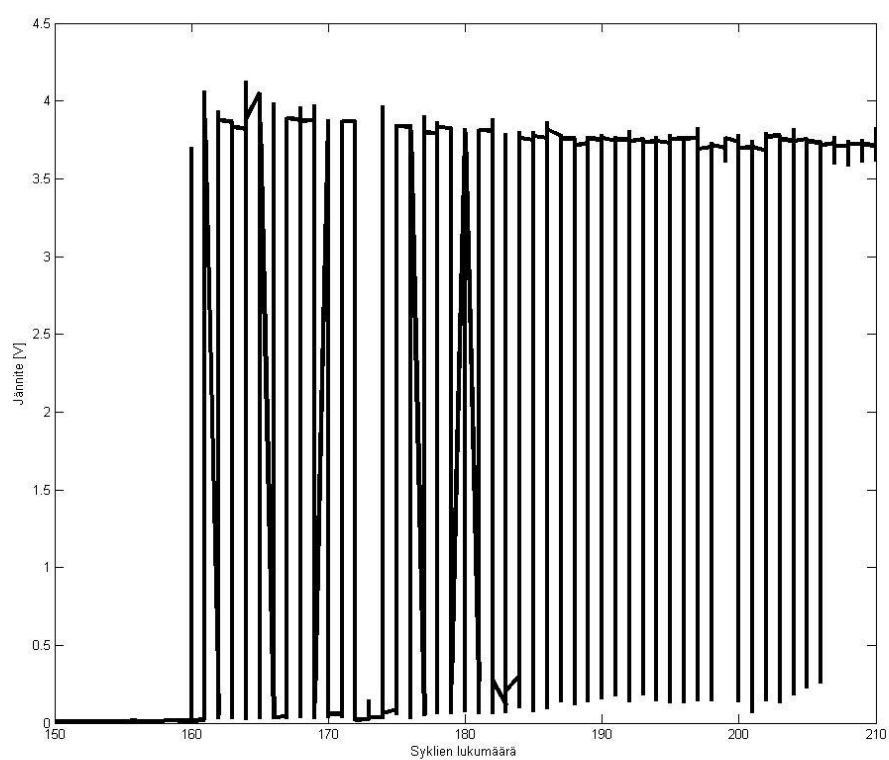
Kuva 5.3. Koesarjojen vikaantumisprosentit syklien mukaan, $N=5$.

Pienien koesarjojen perusteella luotettavuudesta ei voida tehdä riittävän tarkkoja tilastollisia päätelmiä. Kuvassa 5.3 käsitellään koesarjojen vikaantumisprosenttia syklien

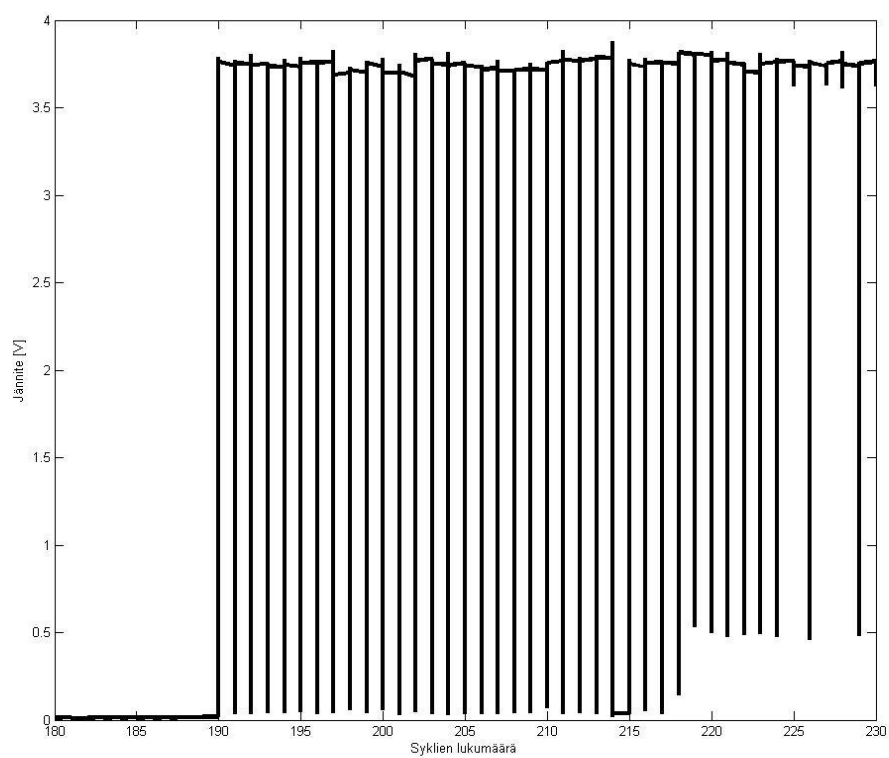
suhteen 250 syklin aikana. Kuvasta huomataan välitäytteettömän koesarjan B suhteellisen lineaarinen vikaantumisprosentti syklien edetessä, joka on näin pienillä koesarjoilla ($N=5$) hyvä referenssitulos. Epoksilla välitäytetty koesarja C käyttäytyi odotetusti ja viidestä näytteestä vain kaksi ehti rikkoutumaan 250 syklin kuluessa. Paryleenilla välitäytetyn koesarjan A tulosten mukaan kaksi näytettä on rikkoutunut jo ensimmäisen syklin aikana, joten voidaan epäillä jo prosessin loppuvaiheessa tapahtunutta odottamatonta vikaantumista. Vikaantumisprosentti ei kuitenkaan muutu merkittävästi, vaikka nämä kaksi näytettä poistettaisiin tulosten käsittelystä kokonaan, joten tuloksia voidaan tulkita niin, ettei paryleeni ole parantanut näillä prosessiparametreilla koesarjan luotettavuutta, vaan jopa huonontaisi sitä. Tähän voi olla syynä paryleenin heikko tunkeutuminen sirun alle ja paryleenikerroksen riittämätön paksuus. Paryleenin tunkeutumista käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.4.



Kuva 5.4a. Koesarjan A erään näytteen daisy chain –jännite syklien suhteen.



Kuva 5.4b. Koesarjan B erään näytteen daisy chain –jännite syklien suhteen.



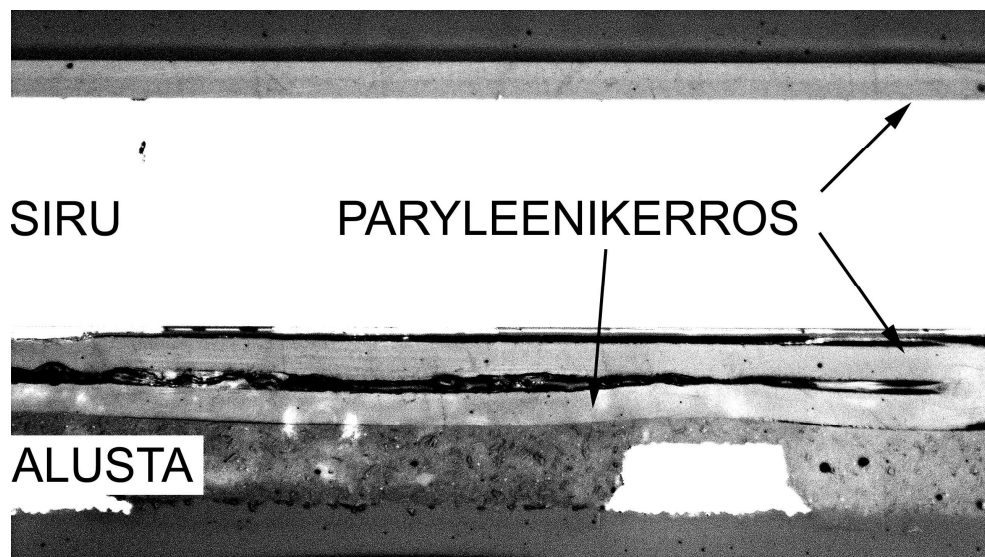
Kuva 5.4c. Koesarjan C erään näytteen daisy chain –jännite syklien suhteen.

Kuvan 5.4 eri kohdissa tutkitaan tarkemmin kaikista koesarjoista valikoitujen näytteiden jännitettä niiden rikkoutumishetkillä. Näytteet edustavat tyypillistä käytöstä näillä koesarjoilla. Jännitteen heilahtelu-aika käytännössä tarkoittaa näytteiden lopullista rikkoutumisnopeutta. Kuvan 5.4 a-kohdassa koesarjasta A valikoidun näytteen jännite heilahtelee 35 syklin aikana, mutta silloinkin vain erittäin vähän, joten näyte on rikkoutunut hyvin nopeasti lämpösyklitestissä. Referenssikoesarjan B heilahtelu kestää 47 sykliä ja sarjan C 40 sykliä ja kuvista on havaittavissa, että lopullinen rikkoutuminen on tapahtunut vasta heilahtelujen jälkeen, eli sen tapahtumiseen on kestänyt huomattavasti kauemmin kuin paryleenipinnoitetulla näytteellä.

5.4. Paryleenin tunkeutuminen kääntösirun alle

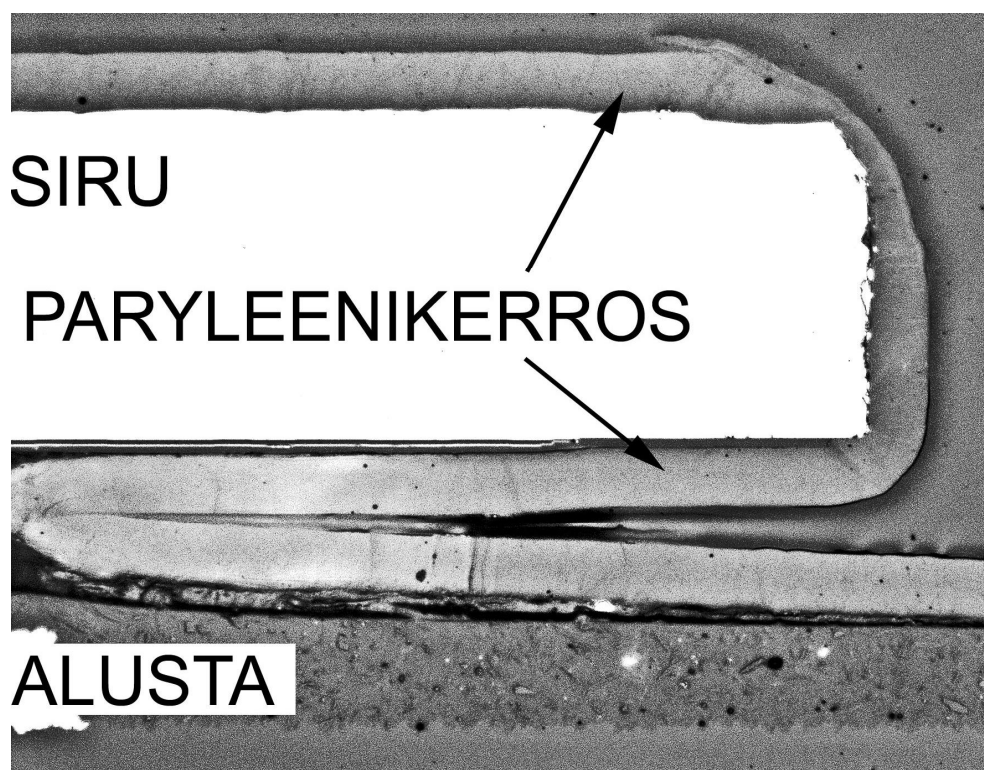
Paryleenikerroksen kasvattaminen höyryvaporisaatioprosessissa perustuu paryleenimolekyylien yksittäiseen siirtymiseen kohteeseensa, joten teoriassa paryleeni voisi tunkeutua täydellisesti kääntösirun ja alustan välille, mikäli etäisyys sirun ja alustan välillä on optimaalinen. Paryleenin tunkeutumiseen vaikuttavat höyryvaporisaatioprosessissa käytetyn reseptin eli halutun kerrospaksuuden lisäksi sirun ja alustan välinen etäisyys toistetaan sekä sirun nystyjen koko ja lukumäärä. Vapaat paryleenimolekyylit liikkuvat kohteisiinsa mielivaltaisesti ja niiden liikkeiden ennustaminen tavoitepinnoitteen paksuutta suuremmassa välitilassa on lähes mahdotonta yhden prosessin perusteella. Tämän diplomityön yhteydessä tehty yksi koesarja paryleenipinnoitteen kanssa kertoo mahdollista viitetietoa paryleenin tunkeutumisesta kääntösirun ja alustan väliin ja arvio koesarjassa käytetystä sopivasta kerrospaksuudesta perustuu kokeneen paryleenitutkijan DI Kati Kokon arviointiin.

Kuvan 5.5 a-kohdassa havaitaan paryleenin tunkeutuminen pisimpään lämpösyklitestissä kestäneen näytekappaleen sirun reunalla 20-kertaisena suurenoksena. Näyte on hiottu sirun reunalle asti, jossa juotenystyt eivät vielä ole näkyvissä. Prosessin mukaan paryleenipinnoitteen paksuus oli noin $18\mu\text{m}$, joka 100-kertaisessa suurenoksessa pystyttiin mikroskoopin avulla toteamaan. Kuvan 5.5 a-kohdan näytekappaleeseen on kuitenkin jäänyt myös ilmaa paryleenipinnoitteen lisäksi sirun alle, mikä osoittaa arvioidun kerrospaksuuden riittämättömyyden kääntösirun välitäytteenä. Ilma heikentää huomattavasti välitäytteen ominaisuuksia.



Kuva 5.5a. Paryleenin tunkeutuminen sirun alle sirun reunalta ja nystyjen ulkopuolelta kuvattuna.

Kuvan 5.5 b-kohdassa on esitelty paryleenin tunkeutumista sirun reunalta tarkasteltuna. Kuva vastaa a-kohdan kuvaa, mutta kuva on tarkennettu sirun toiseen pätyyn, jossa paryleenin tunkeutumisesta saadaan toinen näkökulma. Kuvan perusteella havaitaan, että paryleeni on tunkeutunut sirun päädystä vain osan sirua alle, jonka jälkeen sirun alapinnalle ja alustalle kasvaneet paryleenipinnoitteet ovat kasvaneet yhteen ja paryleenipinnoitteen eteneminen on keskeytynyt.



Kuva 5.5b. Paryleenin tunkeutuminen sirun päädyn alle sirun reunalta kuvattuna.



Kuva 5.5c. Paryleenin tunkeutuminen sirun alle, kun sama näyte on hiottu sirun puoliväliin. Huomataan, että paryleenikerrosta ei ole päässyt kertymään sirun alle.

Kuvan 5.5 c-kohdassa nähdään saman näyte pidemmälle, noin sirun puoliväliin asti hiottuna. Näytteestä voidaan havaita paryleenipinnoite sirun päällä, mutta paryleenipinnoitetta ei ole tunkeutunut sirun alle keskikohdassa käytännössä lainkaan, joten sirun ja alustan välinen tila on täyttynyt vain ilmalla, joka toimii heikosti välitäytteenä. Koska paryleeni ei ole tunkeutunut sirun alle täydellisesti, ei sen vaikutuksesta koesarjojen luotettavuuteen eli toiminnasta hyvänä välitäytteenä voida osoittaa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Paryleenipinnoitteen käyttöä kääntösiruliitosten välitäytteenä on tähän asti tutkittu erittäin vähän ja siitä löytyy vain yksittäisiä tutkimusviitteitä, jotka pääosin koskevat kääntösiruliitosten korjattavuutta. Paryleenipinnoitteen käyttö välitäytteenä ei luotettavuuden kannalta ole itsestään selvää, sillä perinteiset epoksivälitäytteet kompensoivat tehokkaasti ja edullisesti sirujen ja edullisten lasikuitu- tai polymeerialustojen välisiä lämpölaajenemiskertoimien eroja. Sirujen korjattavuuden merkitystä pohdittaessa esiin tulee kysymys siitä, että kannattaisiko kalliiden sirujen tapauksissa pyrkiä käyttämään myös kalliita ja ominaisuuksiltaan huomattavasti parempia keraamialustoja, jolloin erillistä välitäytettä ei välttämättä tarvittaisi; tämä kuitenkin vaatii useimmiten koko järjestelmän latomisen samalle keraamilevyille, mikä saattaa olla ongelma, jolloin ohuen orgaanisen alustan käyttö on erittäin ymmärrettävää.

Paryleenivälitäytteen edut nousevat esiin käytettäessä lasitransitiolämpötilaltaan pieniarvoisia alustoja tai muuten lämpöherkkiä kokoonpanoja, jotka juotetaan selektiivisesti laserin avulla ja prosessoidaan muutenkin erittäin matalissa lämpötiloissa. Toisaalta myös muut vaihtoehdot, kuten kehittyneemmät ennalta annosteltavat välitäytteet pystyvät osin ratkaisemaan tämän ongelman ollen samalla nykyprosessien kanssa yhteensopivampia ja edullisempia.

Työn teoriaosuudessa ennustetut mekanismit sekä paryleenin tunkeutumiselle kääntösiruliitoksen väliin että sen toiminta välitäytteenä sekä käyttö sirun ja alustan lämpölaajenemiskertoimien yhteensopivuuden parantamiseksi ei tuottanut hyviä tuloksia työn kokeellisessa osuudessa erityisesti perinteiseen epoksivälitäytteeseen verrattuna. Paryleeni ei tunkeutunut välitilaan odotetusti ja täten ei myöskään suojannut liitosta lämpösyklitestauksen rasituksilta. Tämän työn pienien koesarjojen ja paryleenin huonon tunkeutumisen perusteella ei voida tehdä tarkkoja päätelmiä ja tilastollisesti pätevää analyysiä paryleenin vaikutuksesta kääntösirujen luotettavuuteen.

Jatkotutkimuksen kannalta paryleenin vaikutus kääntösiruliitoksen välitäytteenä kannattaisi mallintaa elementtimenetelmällä, jonka perusteella pystyttäisiin arvioimaan tarvittava paryleenipinnoitteen paksuus ennalta paremmin. Ehdotukseni jatkotutkimuksen kuluksi on seuraava: paryleenipinnoitteen paksuutta sirujen alla tutkitaan ensin paryleenipinnoitteen funktiona esimerkiksi pinnoittamalla helpommin tutkittavia kahden lasilevyn järjestelmiä erisuuruisilla väleillä ja erikokoisilla ”siruilla”, ja tutkimalla paryleenin tunkeutumista näihin väleihin. Tämän perusteella voidaan tehdä päätelmiä myös

siitä, minkä kokoiseen välitilaan paryleenipinnoite tunkeutuu tehokkaimmin eli kuinka lähellä tai kaukana siru voi olla alustasta, ja onko käytettävien sirujen ja nystyjen koolla, lukumäärällä tai asetelmalla varsinaista merkitystä. Tutkimusta jatketaan eri pinnoitteen paksuuksilla ja tulosten perusteella pystytään muodostamaan vähintään suuntaa-antava matemaattinen malli paryleenin tunkeutumisesta tietyn kokoiseen välitilaan tunnetun paryleenipinnoitteen paksuuden funktiona sekä tarkempaa tietoa paryleenin tunkeutumismekanismeista.

Jatkotutkimuksen seuraava askel on perusteellisen luotettavuustutkimuksen tekeminen riittävänkokoisilla sarjoilla, jonka perusteella varsinainen mahdollinen hyöty paryleenipinnoitteesta kääntösiruliitosten välitäytteenä voidaan osoittaa. Lisäksi luotettavuustestiin voidaan lisätä muita standardien mukaisia testejä, kuten kosteus- ja suolasumutestejä sekä pudotustestejä. Osa testeistä voidaan suorittaa lämpötilaherkille komponenteille ja alustoille, jolloin prosessin soveltuminen erikoisille sovelluksille voidaan osoittaa.

LÄHTEET

- [1] Bartholomew, Martin. P. 1999. An Engineer's Handbook of Encapsulation and Underfill Technology. Electrochemical Publications Ltd. 162 s.
- [2] Beach, W.F., Lee, C., Bassett, D.R., Austin, T.M. & Olson, R. Xylylene Polymers Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol. 17. 2nd ed.
- [3] Benson, R. C., Farrar, D & Miragliotta, J. A. 2008. Polymer Adhesives and Encapsulants for Microelectronic Applications. Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 28, Number 1.
- [4] Callister, William D., Jr. P. 2003. Materials Science and Engineering, an Introduction. John Wiley & Sons. 820 s.
- [5] Datta, M., Osaka, T. & Schultze, J.W. (toim.) 2004. Microelectronic Packaging. 1. painos, CRC Press. Kappaleet 6 ja 12.
- [6] Encyclopedia of Polymer Science and Engineering volume 17, 2. Painos. Wiley-Interscience, 1989. 1072 s. Kappale Xylylene Polymers (s. 990-1025)
- [7] Gilleo, K. 2002. Area Array Packaging Handbook, Manufacturing and Assembly. McGraw-Hill. 817 s.
- [8] Greenstein, M. 1989. Optical absorption aspects of laser soldering for high density interconnects. Applied Optics, Vol. 28, No. 21. November 1989.
- [9] Harsh, K. F., Kladitis, M., Michalicek, M. A., Zhang, J., Zhang, W., Tuantranon, A., Bright, V. M. & Lee, Y. C. 1999. Solder Self-alignment for Optical MEMS. Lasers and Electro-Optics Society 1999 12th Annual Meeting. LEOS '99. IEEE.
- [10] Hienonen, R., Lahtinen, R. 2007. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa. 2. Painos. VTT Publications 623, Espoo. 243 s.
- [11] Karjalainen, P. 2002. Reliability Evaluation of 3-D Structures. Diplomityö, TTKK Sähkötekniikan osasto. 77 s.
- [12] Karttunen, M., Österlund, R., Rounioja, V., Avellan, P., Jussila, M. & Ruuskanen, P. 2000. Kiinteän tilan prosessointi ja metalli-, polymeeri-, keraamiyhdistelmäaerialit. Espoo, VTT Julkaisu 845. 85 s.
- [13] Kumpulainen, S. 2006, Paryleenipinnoitus ja laiteparametrien optimointi. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaalitekniikan osasto. 89 s.
- [14] Lau, John H. (toim.) 1995. Flip Chip Technologies. 1. painos, McGraw-Hill. 553 s.

- [15] Landman, B. S. & Russo, R. L. 1971. On a Pin Versus Block Relationship for Partitions of Logic Graphs. IEEE Trans. on Comput. col. C-20.
- [16] Lee, Y. C. & Tan, Q. 2005. Soldering Technology for Optoelectronic Packaging. Optical Engineering, vol. 98. Marcel Dekker Incorporated, New York.
- [17] Licari, J. 2003. Coating Materials for Electronic Applications: polymers, process, reliability, testing. New York, Noyes/William Andrew. 392 s.
- [18] Lähteenmäki, T. 2001. Kiihdytetyt rasituskokeet elektroniikan luotettavuustestauksessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Automaatiotekniikan osasto. 80 s.
- [19] Machuga, S. C., Lindsey, S. E., Moore, K. D. & Skipor, A. 1992. Encapsulation of Flip Chip Structures. IEEE/CHMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. IEEE. 6 s.
- [20] Lau, J. H., Wong, C.P., Ning-Chen Lee & S.W. Ricky Lee 2003. Electronics Manufacturing with Lead-free, Halogen-free and Conductive-adhesive Materials. 1. Painos, McGraw-Hill.
- [21] National Microelectronics Research Centre (21). P. 2001. FCTC 1 Package Performance Monitoring Test Chip. 21, University College Cork, Ireland June 1, 17s.
- [22] Nurmi, S. 1998. Flip Chip –liittäminen lyijyttömällä juotteilla. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. 74 s.
- [23] Nurmi, S. 2005. Reliability of SnAgCu Solder Joints Under Thermo-Mechanical Stresses. Väitöskirja. Tampere University of Technology Publication 520. 45 s.
- [24] Okura, J. H., Reinikainen, T., Dasgupta, A. & Caers, J. F. J. M. 2000. Guidelines to Select Underfills for Flip Chip on Board Assemblies. Proceedings of 4th International Conference on Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing. IEEE. 7 s.
- [25] Parylene Coating Services Inc. <http://paryleneinc.com/> , viitattu 05/2009-02/2010.
- [26] Puttlitz, K. & Totta, P. A. (toim.) 2001. Area Array Interconnection Handbook. Kluwer Academic Publishers. 1189 s.
- [27] Rabaey, J. M., Chandrakasan, A. & Nikolic, B. 2003. Digital Integrated Circuits, a Design Perspective, Second Edition. Prentice Hall, Pearson Education International. 761 s.
- [28] Specialty Coating Systems. <http://scscoatings.com/> , viitattu 05-1009-02/2010.
- [29] Stepniak, F. 2002. Failure criteria of flip chip joints during accelerated testing. Microelectronics Reliability 42 (2002), s. 1921-1930.

- [30] Suppa, M.: Conformal coatings and their increasing importance for a safe operation of electronic assemblies, *Circuit World* Vol. 33, No. 4, 2007.
- [31] Suryanarayana, D., Varcoe, J. A. & Ellerson, V. 1995. Repairability of Underfill Encapsulated Flip-Chip Packages. *IEEE Trans.*
- [32] Teutsch, T., Zakel, E. & Ghassen, A. 2006. Pulsed-laser Heating for Flip Chip Assembly – a Stress Free Alternative. *Advanced Packaging*, May 2006. 5 s.
- [33] Tong, H., Mok, L. S., Grebe, K. R., Yeh, H. L., Srivastava, K. K. & Coffin, J. T. 1993. Effects of Parylene Coating on the Thermal Fatigue Life of Solder Joints in Ceramic Packages. 40th Electronics Components and Technology Conference. *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, vol. 16, no. 5, August 1993.6 s.
- [34] Toure, T. & Peters, L. 2005. Conformal Coatings for Electronic Assemblies. *Onboard Technology*, November 2005.
- [35] Tummala, Rao R., P. 2001. *Fundamentals of Microsystem Packaging*. 1. Painos. McGraw-Hill. 967 s.
- [36] Valtioneuvoston asetus vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa (Vna 853/2004) sekä siihen liittyvät muutokset Vna 12/2006, Vna 476/2006, Vna 969/2006 ja Vna 369/2006.
- [37] Wong, C. P. & Zhang, Z. 2008. *Materials for Advanced Packaging*, chapter 9: Flip-Chip Underfill: Materials, Process and Reliability. Springerlink 2008.
- [38] Wölflick, P. & Feldmann, K. 2002. Lead-Free Low-Cost Flip-Chip Process Chain: Layout, Process, Reliability. *SEMI Technology Symposium: International Electronics Manufacturing Technology Symposium*. SEMI/IEEE 2002.
- [39] Zhang, K., Pecht M.: Effectiveness of conformal coatings on a PBGA subjected to unbiased high humidity, high temperature tests, *Microelectronics international* Vol. 17, No. 3, 2000.