

Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu

Sähkötekniikan ja automaation laitos

Heidi Huppunen

Korkean lämpötilan testipiirilevyn suunnittelu ja toteutus

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa, 20.5.2015.

Työn valvoja:

Prof. Mervi Paulasto-Kröckel

Työn ohjaaja:

FM Jaakko Korvenoja

Tekijä:	Heidi Huppunen		
Työn nimi:	Korkean lämpötilan testipiirilevyn suunnittelu ja toteutus		
Päivämäärä:	20.5.2015	Kieli: suomi	Sivumäärä: 9+76
Laitos:	Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professuuri:	S-113		
Työn valvoja:	Prof. Mervi Paulasto-Kröckel, Aalto-yliopisto		
Työn ohjaaja:	FM Jaakko Korvenoja, Murata Electronics Oy		
<p>Tässä työssä suunnitellaan ja toteutetaan korkean lämpötilan testipiirilevy porauksenai- kaisessa mittaussovelluksessa käytettävää kiihtyvyyssanturituotetta varten. Tavoitteena on valita korkeaan lämpötilaan sopivat piirilevymateriaali ja komponentit, ja koostaa niistä toimiva testipiirilevy. Lisäksi tavoitteena on koekäyttää valmista testipiirilevyä loppukäytönomaisessa vanhennustestissä sen toiminnan varmistamiseksi. Sopivat kom- ponentit ja piirilevymateriaali testipiirilevyllä käytettäviksi valitaan niiden materiaali- ominaisuuksien perusteella. Lasitransformaatiolämpötilaa ja homologista lämpötilaa tut- kimalla voidaan ennustaa, miten eri materiaalit käyttäytyvät eri lämpötiloissa.</p> <p>Valmista testipiirilevyä paistetaan 200 °C lämpötilassa 24 tuntia kerrallaan yhteensä kymmenen kertaa. Vanhennuksien välissä todetaan piirilevyn toiminta mittaamalla sen linjojen resistansseja sekä tutkimalla juoteliitoksia mikroskoopin avulla. Työssä tehtyjen mittausten perusteella suunniteltu testipiirilevy säilyy toimintakykyisenä kymmenen loppukäyttöä simuloivan vanhennustestin jälkeen. Levyille suoritettavat vanhennukset eivät vaikuta linjojen resistansseihin merkittävästi, ja ainoa havaittava muutos on piirile- vyn ja juoksutejäänteiden tummuminen. Tuloksista päätellään, että lasitransformaatio- lämpötilan ja homologisen lämpötilan perusteella tehdyt materiaalivalinnat ovat onnis- tuneita. Tulosten valossa tässä työssä suunniteltu testipiirilevy on sopiva porauksenai- kaisessa mittaussovelluksessa käytettävän kiihtyvyyssanturin testaamiseen.</p>			
Avainsanat:	Testipiirilevy, lasitransformaatiolämpötila, homologinen lämpötila, sisäänajovanhennustesti, resistanssimittaus		

Author:	Heidi Huppunen		
Name of the thesis:	The design and realization of a high temperature printed circuit test board		
Date:	20.5.2015	Language: Finnish	Number of pages: 9+76
Department:	Department of Electrical Engineering and Automation		
Professorship:	S-113		
Supervisor:	Prof. Mervi Paulasto-Kröckel, Aalto University		
Instructor:	M.Sc. Jaakko Korvenoja, Murata Electronics Oy		
<p>In this thesis a printed circuit test board, for an accelerometer for measurement while drilling application, is designed and realized. The goal of this thesis is to select appropriate high temperature compatible PCB laminate materials and components, and to build a working printed circuit test board from them. In addition, the goal is to conduct a test for the designed test PCB similar to the end application to proof its functionality. The suitable components and PCB laminate materials are selected based on their material properties. By studying the glass transition temperature and homologous temperature, the behavior of materials in different temperatures can be predicted.</p> <p>The finished printed circuit test board undergoes a series of ten 24 hour long burn-in tests with a burn-in temperature of 200 °C. In between the burn-ins, the functionality of the test PCB is verified by measuring the resistance of its signal routes and by studying the solder connections with a microscope. According to the measurements made in this thesis, the designed test PCB maintains its functionality after ten burn-in tests, which are similar to the end application of the test PCB. The burn-ins performed do not have an influence on the resistances of the signal routes of the test PCB. The only detectable change is the darkening of the PCB laminate and flux residues. Based on the results, it can be concluded that the material choices made in this thesis, based on the glass transition temperature and homologous temperature, are successful. In the light of the results the printed circuit test board is compatible to be used as a test PCB for an accelerometer for measurement while drilling application.</p>			
Keywords:	Printed circuit test board, glass transition temperature, homologous temperature, burn-in test, resistance measurement		

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Murata Electronics Oy:n HW-Design -ryhmässä. Kiitän ryhmää mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta, jota olivat ideoimassa Mika Sipilä, Jani Taiminen ja ohjaajani Jaakko Korvenoja. Kiitän myös Jaakko Korvenojaa työni ohjauksesta ja hyvistä neuvoista työn teon aikana. Kiitos työni valvojalle Mervi Paulasto-Kröckelille suuresta avusta työn viimeistelyvaiheessa.

Kiitos HW-Design -ryhmälle avustanne työn aikana. Erityisesti haluan kiittää Antti Ritasta avusta vanhennustestien käynnistämisessä, Janne Ylilääkkölää vanhennustestien yhteyskaapelin juottamisesta, ja Lauri Suotulaa työn tarkasta oikoluvusta ja loistavista korjausehdotuksista.

Diplomityön tekoon liittyvä apu on tärkeää, mutta ilman muunlaista tukea ja apua tähän pisteeseen pääsy olisi ollut vaikeaa. Siksi haluan osoittaa lämpimät kiitokset lukioaikaiselle matematiikan opettajalleni, jonka ansiosta rohkenin tavoitella unelmiani ja hakeutua tekniikan alan opintoihin. Kiitos Saija. Kotoa saatu tuki puolestaan auttoi pitämään päänsä kasassa diplomityön teon aikana. Tästä kiitän Oskaria, Volttia ja Ampeeria.

Espoossa 20.5.2015

Heidi Huppunen

Sisällysluettelo

Alkusanat	IV
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	VII
1 Johdanto	1
2 Kiihtyvyyssanturi ja sen testaaminen	3
2.1 MEMS-teknologiaan perustuva kiihtyvyyssanturi	3
2.2 Kiihtyvyyssanturin käyttö poranterän ohjauksessa	6
2.3 Kiihtyvyyssanturituotteen testaus ja testijärjestelmä	8
2.3.1 Luotettavuustestit	9
2.3.2 Laadunvarmistustestit	12
2.4 Testipiirilevylle asetettavat vaatimukset	13
3 Testipiirilevyssä esiintyvät materiaalit	14
3.1 Paljas piirilevy	17
3.2 Juote	23
3.2.1 Väsyminen	24
3.2.2 Viruminen	27
3.3 Kondensaattorit	30
3.4 Liittimet ja testikannat	31
3.3.1 Polymeerit	31
3.3.2 Metalliseokset	33
4 Testipiirilevyn suunnittelu ja testaus	37
4.1 Oheiskomponenttien ja juotteen valinta	37
4.2 Piirilevyn suunnittelu	40
4.3 Piirilevyn testauksen suunnittelu	43
5 Testitulokset ja arviointi	49
5.1 Piirilevyn käyttöönotto	49
5.2 Resistanssimittaukset	50
5.3 Piirilevyn visuaalinen seuranta	52
5.4 Työn tulosten arviointi	55
6 Yhteenveto	58
Lähdeluettelo	60
Liite A: Testipiirilevyn piirikaavio	65
Liite B: Testipiirilevyn reititys	69

Liite C: Testipiirilevyn poikkileikkaus	73
Liite D: Resistanssimittausten tulokset	74

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

A	Atsimuutti
a	Kiihtyvyys
Δa	Kiihtyvyyden muutos
A_0	Vetotestinäytteen alkuperäinen poikkipinta-ala
A_C	Kiihtyvyyssanturielementin liikkuvan massan ja referenssipinnan päällekkäisen alueen pinta-ala
C	Kapasitanssi
ΔC	Kapasitanssin muutos
C_0	Nimelliskapasitanssi
d	Kiihtyvyyssanturielementin liikkuvan massan ja referenssipinnan välinen etäisyys
E	Kimmokerroin
F	Kiihtyvyyssanturielementin liikkuvan massan hitautta kuvaava voima
F_k	Kiihtyvyyssanturielementin jousen massaan kohdistama voima
F_t	Vetävä voima
I	Inklinaatio
k	Jousivakio
l	Näytteen pituus
Δl	Näytteen pituuden muutos
l_0	Näytteen alkuperäinen pituus
m	Massa
N	Toistojen määrä
N_f	Vikaantumisaste
t	Aika
T	Lämpötila
T_a	Huoneenlämpötila
t_b	Vanhennustestin kokonaiskesto
t_c	Lämpösyklitestin kokonaiskesto
T_g	Lasitransformaatiolämpötila
T_h	Homologinen lämpötila
T_{liq}	Sulamislämpötila
T_{max}	Maksimilämpötila
T_{min}	Minimilämpötila
T_{ref}	Referenssilämpötila

$t_{s,max}$	Lämpösyklitestin maksimilämpötilassa vietetty aika
$t_{s,min}$	Lämpösyklitestin minimilämpötilassa vietetty aika
T_u	Käyttölämpötila
α	Lämpölaajenemiskerroin
β	Kondensaattorin lämpötilakerroin
ε	Venymä
ε_0	Tyhjiön permittiivisyys
ε_n	Nimellisvenymä
ε_r	Suhteellinen permittiivisyys
σ	Jännitys
σ_b	Murtolujuus
σ_n	Nimellisjännitys
σ_y	Myötölujuus
1210	Pintaliitoskondensaattorin kotelokoko
A/D	ASIC-piirin analogia-digitaalimuunnin
AIO	Kiihtyvyyssanturin analoginen sisään- ja ulostulo (analog input/output)
ASIC	Sovelluskohtainen integroitu piiri (application specific integrated circuit)
AVDD	Kiihtyvyyssanturin analogiakäyttöjännite (analog drain voltage)
AVSS	Kiihtyvyyssanturin analogiamaa (analog source voltage)
C/V	ASIC-piirin kapasitanssi-jännitemuunnin
CSB	Laitteen valintalinja (chip select bit)
CTE	Lämpölaajenemiskerroin (coefficient of thermal expansion)
DIP	Kiihtyvyyssanturin kotelotyyppi (dual in-line package)
DUT	Tuotepaikka (device under test)
DVDD	Kiihtyvyyssanturin digitaalikäyttöjännite (digital drain voltage)
DVSS	Kiihtyvyyssanturin digitaalimaa (digital source voltage)
FR-4	Piirilevyn eristemateriaali (flame retardant)
MEMS	Mikroelektromekaaninen systeemi (micro electro mechanical system)
MISO	Isännän vastaanottolinja, orjan lähetyslinja (master in slave out)
MLCC	Monikerroksinen kondensaattori (multilayer ceramic chip capacitor)
MOSI	Isännän lähetyslinja, orjan vastaanottolinja (master out slave in)
MWD	Porauksenaikainen mittaus (measurement while drilling)
PEEK	Polyeetterieetteriketoni (polyetherether ketone)
PPS	Polyfenyleenisulfidi (poly-phenylene sulfide)

SAC	Juoteseos (SnAgCu)
SCLK	Kellosignaalin linja (serial clock)
SPI	Synkroninen sarjaväylä (serial peripheral interface)
TAL	Aika sulamispisteen yläpuolella (time above liquidus)
UTS	Murtolujuus (ultimate tensile strength)

1 Johdanto

Elektroniikkatuotteilta edellytetään nykypäivänä toimintakykyä yhä haastavammissa ympäristöissä ja sovelluksissa. Entistä monimutkaisemmat komponentit altistuvat elinikänsä aikana suurille lämpötilanvaihteluille, värinälle ja kosteudelle. Siksi komponenttien huolellinen testaaminen sekä suunnitteluvaiheessa että ennen asiakkaalle lähettämistä on ensiarvoisen tärkeää. Suunnitteluvaiheessa suoritettavat luotettavuustestit kertovat prototyypin luotettavuudesta sekä heikoista kohdista, jolloin testit auttavat tuotteen luotettavuuden kehittämisessä. Tuotannon laadunvarmistustesteissä taas varmistetaan, että tehtaalta lähtevät komponentit ovat ensiluokkaisia, eivätkä vikaannu heti käyttöönoton jälkeen.

Komponentteja, esimerkiksi kiihtyvyyssantureita, testataan tavallisesti vaihtuvissa käyttölämpötiloissa niiden toiminnan varmistamiseksi. Matkapuhelimiin tarkoitettavat osat testataan tyypillisesti $-40\text{ °C} \dots +85\text{ °C}$ lämpötila-alueella. Autoteollisuuden komponentit puolestaan vaativat jo $-40\text{ °C} \dots +125\text{ °C}$ testilämpötila-alueen laajemman käyttölämpötila-alueensa takia. Tiedetyt erikoistuotteet, jotka on esimerkiksi määritelty käytettäväksi erittäin korkeissa lämpötiloissa, vaativat testausta tyypillisten lämpötila-alueiden ulkopuolelta. Muun muassa poranteriin asennettujen kiihtyvyyssantureiden tulisi kestää jopa 200 °C käyttölämpötilaa, joka tarkoittaa tuotteiden testaamista vähintään 200 °C lämpötilassa.

Tuotteiden testaamisen mahdollistavat niille suunnitellut erilaiset testilaitteistot. Lämpötilatestit vaativat testipiirilevyn, jolle testattavat komponentit asennetaan; testiunin, johon levy komponentteineen laitetaan; sekä emokortin tai kaapeloinnin, jolla tuotteilta mitattu testi-informaatio saadaan tuotua ulos uunista ulkoiselle mittalaitteistolle edelleen analysoitavaksi. Edellä mainituilla tyypillisillä lämpötila-alueilla tavalliset piirilevy- ja komponenttimateriaalit ovat ominaisuuksiltaan riittäviä, ja testipiirilevy voidaan suunnitella ja toteuttaa tavanomaisilla yleisimmin käytössä olevilla materiaali- vaihtoehdoilla. Kuitenkin erittäin korkean lämpötilan testeissä ongelmaksi nousee piirilevyllä käytettävien materiaalien valinta, sillä tavanomaiset elektroniikkakomponentit ja piirilevymateriaalit eivät välttämättä kestä käyttöä testin vaatimalla lämpötila-alueella.

Tässä työssä on tarkoituksena suunnitella ja toteuttaa korkeaan lämpötilaan soveltuva testipiirilevy. Työn tilaajayritys tarvitsee kyvykkyyden testata kiihtyvyyssanturituotteita tavallista korkeammassa lämpötilassa, jossa yleisimmät elektroniikkakokoonpanoissa käytetyt materiaalit ja komponentit eivät enää kestä vikaantumatta. Työn tavoitteena on suunnitella testipiirilevy, jolla kyetään testaamaan maaperän porauksenaikaiseen mittaussovellukseen tarkoitettua kiihtyvyyssanturituotetta. Tässä testipiirilevyllä tarkoitetaan paljaan piirilevyn sekä sille asennettujen tarvittavien oheiskomponenttien, kuten passiivien ja liitinten, muodostamaa kokonaisuutta. Tavoite kattaa sopivien korkean lämpötilan kestävien piirilevymateriaalien ja komponenttien valitsemisen sekä piiri-

levyn suunnittelun ja varsinaisen toteutuksen. Tavoitteena on myös lopuksi koekäyttää valmista testipiirilevyä sopivassa lämpötilatestissä, jotta nähdään olivatko työn aikana tehdyt ratkaisut onnistuneita.

Työn alussa esitellään yleisimmin käytössä olevan kiihtyvyyssanturityypin toiminta, sekä näytetään, kuinka kiihtyvyyssantureita voidaan käyttää öljynporausterän ohjaamisessa. Lisäksi kerrotaan, kuinka kiihtyvyyssanturituotteita tulisi testata niiden toiminnan varmistamiseksi, ja määritellään tarkat tavoitteet tässä työssä suunniteltavan testipiirilevyn toteutukselle ja halutulle kyvykkyydelle. Luvussa 3 käydään läpi syitä, miksi tavanomaiset elektroniikkakokoonpanoissa käytetyt piirilevymateriaalit ja komponentit eivät tämän työn puitteissa ole käyttökelpoisia vaihtoehtoja testipiirilevyssä käytettäväksi. Lisäksi teoriaosuudessa tutustutaan lähemmin korkean lämpötilan aiheuttamiin muutoksiin eri materiaalien käyttäytymisessä. Luvussa 4 käydään läpi testipiirilevyn suunnittelu vaihe vaiheelta materiaalivalinnoista itse piirilevyn reitityksen suunnitteluun ja testilaitteiston rakentamiseen. Tässä osassa valitaan myös sopivat testit, jotka suoritetaan valmiilla piirilevyllä sen toimivuuden todentamiseksi. Luvussa 5 esitellään ja arvioidaan työn tärkeimmät tulokset, sekä pohditaan mahdollisia jatkokehitysvaihtoehtoja. Viimeiseksi esitetään lyhyt yhteenveto koko työstä.

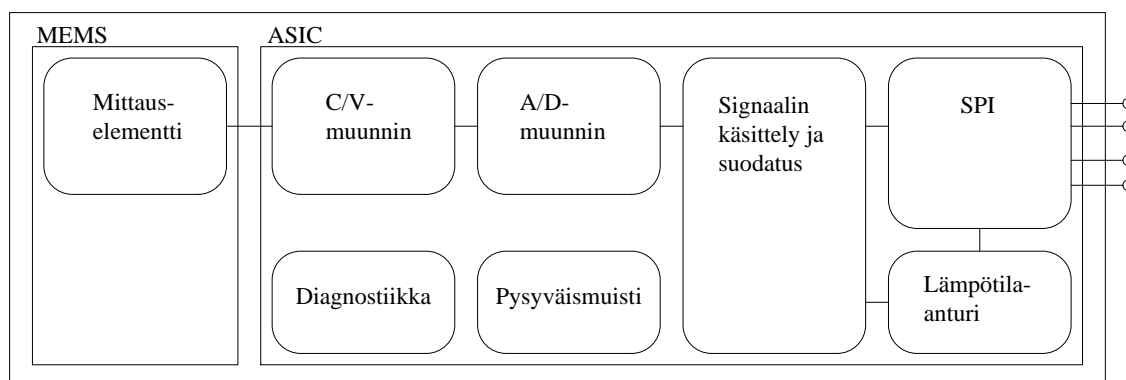
2 Kiihtyvyyssanturi ja sen testaaminen

Tässä työssä suunnitellaan testipiirilevy korkean lämpötilan kiihtyvyyssanturituotteelle, joten seuraavaksi esitellään tyypillinen kiihtyvyyssanturi ja sen toimintaperiaate. Lisäksi tarkastellaan, mihin sovellukseen työssä käsiteltävää kiihtyvyyssanturituotetta aiotaan käyttää. Lopuksi määritellään tarkat rajat, millainen testipiirilevy kiihtyvyyssanturille tarvitaan, mitä sen tulisi voida tehdä, ja miten piirilevyä tullaan tämän työn puitteissa testaamaan.

2.1 MEMS-teknologiaan perustuva kiihtyvyyssanturi

Tämä diplomityö on tehty yritykselle [1], jonka valmistamat anturit pohjautuvat kapasitiiviseen mikroelektromekaaniseen (micro electro mechanical system, MEMS) teknologiaan. Siinä piistä ja lasista valmistetut mittauselementit havaitsevat liikettä ja sen muutosta muuttuvan kapasitanssin avulla. Tässä alaluvussa esitellään tarkemmin kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate. Jatkossa kiihtyvyyssanturilla viitataan kapasitiiviseen MEMS-anturiin, ellei toisin mainita.

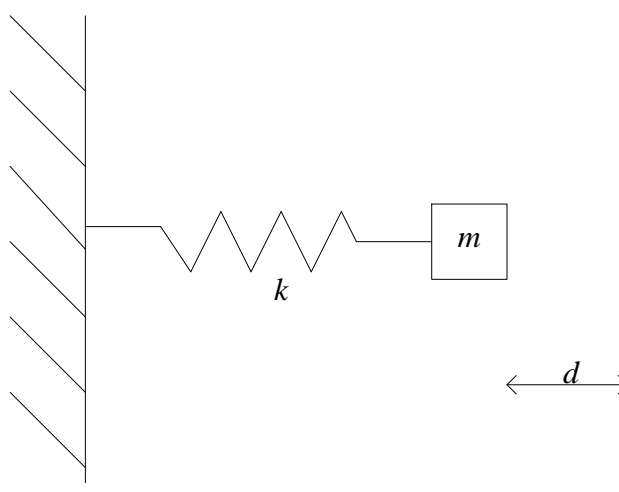
Tyypillinen kiihtyvyyssanturi on koteloitu johonkin yleiseen komponenttikoteloon, ja sisältää yhden tai useamman mittauselementin sekä kiihtyvyyssanturiin soveltuvan sovelluskohtaisen integroidun piirin, lyhyemmin ASIC-piirin (application specific integrated circuit). Kiihtyvyyssanturin yksinkertaistettu lohkokaavio on esitetty kuvassa 1. Kiihtyvyys aistitaan MEMS-lohkon avulla, ja mitattu kapasitanssitieto välitetään ASIC-lohkolle, jossa suoritetaan muunnos kapasitanssista jännitteeksi. Analogiajännite muunnetaan digitaaliseksi ja suodatetaan. Lopuksi mittautietoa saadaan ulos anturilta SPI-väylän (serial peripheral interface) avulla. Olennaisimmat kuvassa 1 esitetyt lohkot esitellään seuraavaksi tarkemmin.



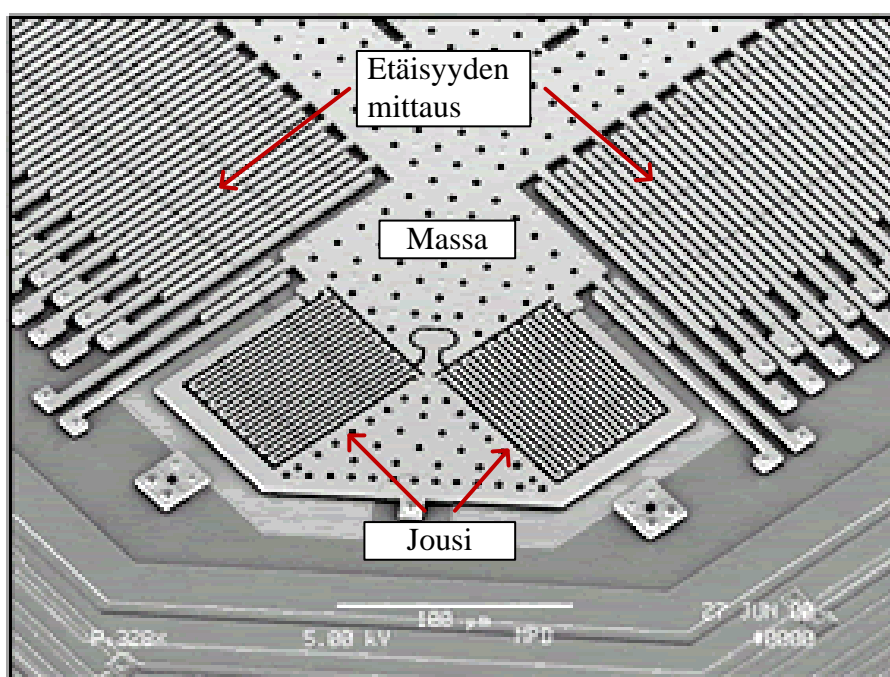
Kuva 1: Kiihtyvyyssanturin lohkokaavio. Muokattu lähteestä [2].

Kapasitiivisen MEMS-mittauselementin toiminta perustuu yksinkertaiseen jousi-massa-systeemiin, jonka periaatekytkentä on esitetty kuvassa 2. Kuvassa 2 on jousen k varassa

liikkuva massa m , jonka etäisyys d referenssipinnasta muuttuu, kun jousi-massa-systeemi joutuu kiihtyvään liikkeeseen. Etäisyyden d muutoksesta voidaan havaita systeemin kiihtyvyyden muutos. Todellinen MEMS-kiihtyvyyssanturielementti on puolestaan esitetty kuvassa 3. Kuvan 3 anturilla voidaan havaita kiihtyvyyttä kahdessa eri suunnassa yhtäaikaisesti, sillä massa voi liikkua vapaasti koko X-Y-tasossa. Kuvan anturi on siis niin sanottu kaksiakselinen kiihtyvyyssanturi. Massan etäisyyttä referenssipinnasta mitataan sormimaisten ulokkeiden avulla, jotka ovat limittäin kiinteiden tasojen välissä. Näin mittaussignaalia saadaan vahvempi, kun muuttuvaa etäisyyttä mitataan useammasta kohdasta yhtä aikaa. Jos kiihtyvyyssanturista halutaan kolmiakselinen, voidaan kotelon sisään asentaa esimerkiksi kaksi kaksiakselista MEMS-elementtiä, joiden tarjoamasta neljän eri akselin mittaustiedoista valitaan kolme parasta siten, että koko X-Y-Z-avaruuden alue saadaan katettua.



Kuva 2: Jousi-massa-systeemi.



Kuva 3: MEMS-pohjainen kiihtyvyyssanturielementti [3].

Koska muuttuvan etäisyyden mittaaminen olisi hankalaa, määritetään kiihtyvyyden muutos muuttuvan kapasitanssin avulla. Mittauselementin kahden pinnan, eli vapaasti jousen varassa liikkuvan massan ja paikallaan pysyvän referenssipinnan, välinen kapasitanssi C saadaan pintojen välisestä etäisyydestä, sekä niiden päällekkäisen alueen pinta-alasta:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_C}{d}, \quad (1)$$

missä ε_0 on tyhjiön permittiivisyys, ε_r pintojen väliselle materiaalille ominainen suhteellinen permittiivisyys, A_C pintojen päällekkäisen alueen pinta-ala ja d pintojen välinen etäisyys. MEMS-elementin massan liike aiheuttaa kapasitanssin muutoksen, joka havaitaan piirin varauksen muutoksena. Muuttunut varaus luetaan C/V-muuntimen avulla ASIC-piirille koetun kiihtyvyyden muutoksen määrittämiseksi. Kiihtyvyys saadaan käyttämällä Newtonin ja Hookeen lakeja

$$F = ma \quad (2)$$

ja

$$F_k = -kd, \quad (3)$$

missä F on liikkuvan massan hitautta kuvaava voima, m liikkuvan massan massa, a koettu kiihtyvyys, F_k jousen massa kohdistama voima, k massaa paikallaan pitelevän jousen jousivakio ja d massan poikkeama tasapainotilasta. Kun kirjoitetaan $F = F_k$ ja korvataan etäisyys d yhtälöstä (1) saadulla relaatiolla, saadaan kiihtyvyyden muutoksel-

$$\Delta a = -\frac{k}{m} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{\Delta C}. \quad (4)$$

Yhtälön (4) avulla anturin kokema kiihtyvyyden muutos voidaan laskea ASIC-piirillä MEMS-elementillä havaitusta kapasitanssin muutoksesta. Kiihtyvyyden muutoksen laskuun tarvittu yhtälön (4) vakiot tallennetaan ASIC-piiriin pysyvämuistiin yleensä kiihtyvyysanturin tehdaskalibroinnin yhteydessä.

ASIC-piiri huolehtii mittaustiedon käsittelyn lisäksi myös tiedon edelleen lähettämisestä. Mitattu informaatio saadaan kiihtyvyysanturilta ulos ulkoiselle mittauselektronikalle SPI-väylän [4] avulla. SPI on hyvin yksinkertainen synkroninen sarjaväylä, minkä ansiosta se on erittäin tehokas valinta isäntä-orja-tyyppiseen (master-slave) kommunikointiin. SPI-väylä perustuu kommunikoiden laitteiden yksittäisiin siirtorekistereihin, jotka toimivat sekä vastaanottimina että lähettiminä. Väylä vaatii toimiakseen neljä linjaa isännän ja jokaisen orjan välille:

- SCLK-linja (serial clock), kellosignaali, jolla laitteet tahdistetaan keskenään,
- MOSI-linja (master out slave in), jota pitkin isäntä lähettää ja orja vastaanottaa,

- MISO-linja (master in slave out), jota pitkin isäntä vastaanottaa ja orja lähettää, ja
- CSB-linja (chip select bit), jota pitkin isäntä valitsee kulloinkin kommunikointivuorossa olevan orjalaitteen.

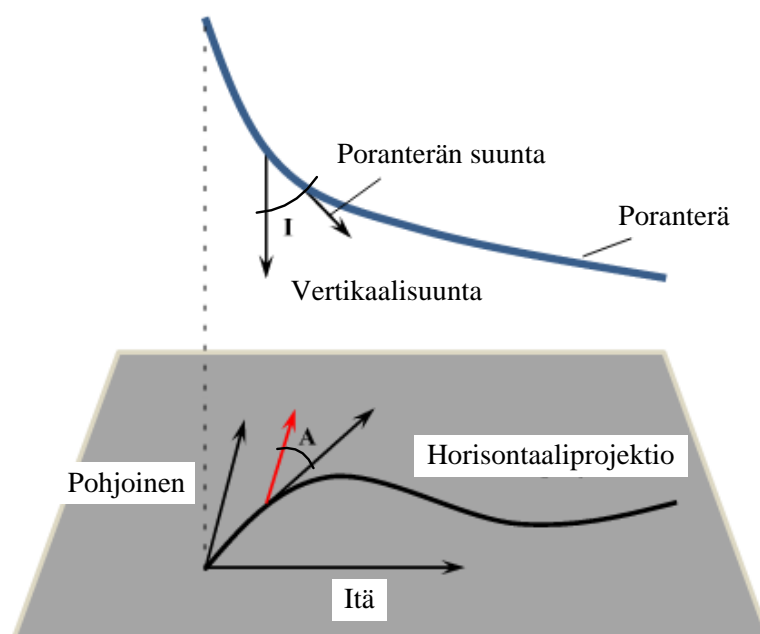
Kaikki rekisterit tahdistetaan isännän lähettämän kellosignaalin avulla SCLK-linjaa pitkin, jotta virheetön tiedonsiirto on mahdollista. Isäntä valitsee kommunikointivuorossa olevan laitteen CSB-linjalla, minkä jälkeen tiedonsiirto voi alkaa. Molemmat laitteet kommunikoivat yhtä aikaa, eli ne sekä vastaanottavat että lähettävät tietoa samanaikaisesti. Bitti siirtyy ulos isännän rekisteristä, minkä jälkeen se välittyy suoraan orjan rekisteriin MOSI-linjaa pitkin. Samanaikaisesti bitti siirtyy ulos orjan rekisteristä, ja siirtyy MISO-linjaa pitkin isännän rekisteriin. Tiedon vastaanotto tapahtuu aina väistämättä, vaikka toinen laitteista todellisuudessa vain lähettäisi tietoa. Pelkän lähetyksen tapauksessa vastaanotettu tieto vain sivuutetaan. Kiihtyvyyssanturisovelluksissa anturi toimii SPI-kommunikoinnin kannalta orjana, ja isäntälaitteena on useimmiten mikrokontrolleri. Mikrokontrolleri hoitaa kaiken kommunikoinnin kiihtyvyyssantureiden kanssa, ja voi olla liitettynä esimerkiksi mittauselektronikkaan tai kiihtyvyystietoa tarvitsevaan laitteistoon.

2.2 Kiihtyvyyssanturin käyttö poranterän ohjauksessa

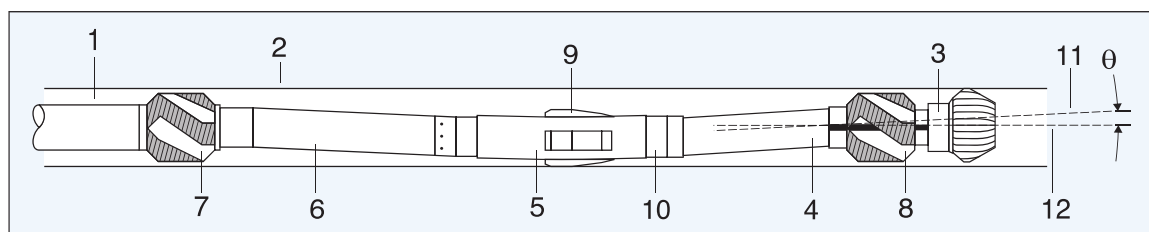
Suuntausporauksella tarkoitetaan öljynporausterän ohjaamista reaaliaikaisesti porauksen aikana kerätyn mittaustiedon perusteella. Mittatiedon reaaliaikaista keräämistä kutsutaan porauksenaikaiseksi mittaukseksi [5] [6] (measurement while drilling, MWD). Esimerkiksi öljynporausta saadaan tehostettua suuntausporauksella, kun merellä sijaitsevalta öljynporauslautalta voidaan porata eri suunnilla sijaitseviin öljylähteisiin samaa lauttaa tukikohtana käyttäen. Ennen porauksen aloittamista määritellään haluttu porausreitti, ja porauksen aikana tehdyillä mittauksilla varmistetaan, että pora todella kulkee haluttua reittiä pitkin sen suuntaa tarpeen mukaan muuttamalla. Kuvassa 4 havainnollistetaan poran kulkua maankuoressa, sekä siellä mitattavia suureita. Tyypillisesti porataan ensin lähes kohtisuoraan alaspäin maksimissaan noin kymmenen kilometrin syvyyteen, minkä jälkeen poran kulku muuttuu pääasiassa sivuttaissuuntaiseksi. Sivuttaissuuntaan voidaan jatkaa kymmeniä kilometrejä, kunnes saavutaan öljylähteen luo. Porauksen aikana mitataan sekä inkliinaatiota I , eli poikkeamaa pystysuorasta suunnasta, että atsimuuttia A , eli poikkeamaa horisontaaliprojektion pohjoisesta suunnasta. Inkliinaatio- ja atsimuuttitiedon avulla poran kulkureittiä voidaan valvoa sekä säätää tarvittaessa.

Kuvassa 5 on esitelty maankuoressa kulkevan porauslaitteen tärkeimmät osat. Tämän työn kannalta kiinnostavin on osa 8, eli MWD-järjestelmä. Mittausjärjestelmä voidaan toteuttaa kahdella eri tapaa: joko gyroskooppipohjaista tai magnetometripohjaista järjestelmää käyttäen. Gyroskooppipohjaisessa järjestelmässä inkliinaatio- ja atsimuuttikulmat mitataan gyroskooppia ja kiihtyvyyssanturia hyväksi käyttäen, kun taas yleisemmin käytetty magnetometripohjainen järjestelmä toimii magneettivuosensorin ja kiihtyvyyss-

anturin avustuksella. Koska atsimuuttikulma riippuu magneettisesta pohjoisesta, magnetripohjainen järjestelmä voi suoriutua heikosti esimerkiksi maaperässä, joka sisältää paljon magneettista materiaalia. Lisäksi magneettivuosensorit ovat herkkiä poran pyörimiselle ja porausnesteen virtaamiselle. Tällöin vaihtoehtona voidaankin käyttää gyroskooppipohjaista järjestelmää, jonka rajoituksena on kuitenkin varsin lyhyt porauskyvykyys. Vaikka molemmilla menetelmillä on omat rajoituksensa, on kuitenkin selvää, että porauksen aikainen mittaus on tärkeä sovelluskohde kiihtyvyyssantureille, sillä sekä magnetripohjainen että gyroskooppipohjainen järjestelmä tarvitsevat toimiakseen kiihtyvyyssanturin.



Kuva 4: Poran kulku maankuoressa. Muokattu lähteestä [5].



Kuva 5: Porauslaitteen osat. 1. Porausjohto. 2. Porauskuilu. 3. Porankärki. 4. Moottori. 5. Poraussuunnan hallintayksikkö. 6. MWD-järjestelmä. 7. Ylempi stabilaattori. 8. Alempi stabilaattori. 9. Stabilaattorin terät. 10. Lohko, joka mahdollistaa kulmanmuutoksen θ porauslaitteen (11) ja keskilinjan (12) välille. Muokattu lähteestä [6].

Porauslaite saavuttaa maankuoressa jopa kymmenen kilometrin syvyyden ennen sivuttaisuuntaan kääntymistä, minkä takia porausympäristö asettaa kovia vaatimuksia suuntaa mittaaville kiihtyvyyssantureille. Erityisesti käyttölämpötila maankuoren sisällä muodostaa haasteen, sillä maan kuori lämpenee nopeasti syvemmälle mentäessä. Lämpöenergiaa johtuu maan kuumasta ytimestä kuorikerrokseen asti, ja tämän lämpövuon

ansiosta lämpötila maan kuoressa nousee keskimäärin 25–30 °C/km [7] pinnalta syvemmälle ytimeen päin mentäessä. Kymmenen kilometrin syvyydellä kiihtyvyyssanturin käyttölämpötilan voidaan siis olettaa olevan noin 250–300 °C. Kiihtyvyyssantureiden huolellinen testaaminen ja toiminnan varmistaminen onkin todella tärkeää, sillä käyttölämpötila poikkeaa huomattavasti normaalista käyttölämpötila-alueesta, eikä poranteeseen asennettua anturia voida vaihtaa helposti kesken porauksen.

2.3 Kiihtyvyyssanturituotteen testaus ja testijärjestelmä

Kiihtyvyyssanturivalmistajat tekevät sisäisesti erilaisia kestävyys- ja hyväksymistestejä anturituotteilleen niiden laadun ja toiminnan todentamiseksi. Testijärjestelmän huolellinen suunnittelu on tärkeää, sillä itse järjestelmä ei saisi missään tilanteessa vaikuttaa testitulokseen, eli sen pitäisi käytännössä toimia vikaantumatta sille määritellyissä rajoissa. Järjestelmän osien tulee siis olla mahdollisimman luotettavia ja kestäviä niille määritellyn käyttöajan ajan. Osien ikääntymistä on valvottava testien välissä, ja selvästi vanhentuneet osat on vaihdettava hyvien testitulosten varmistamiseksi. Järjestelmän suunnittelun yksi vaihe on siis myös järjestelmän osien käyttöajan määrittäminen. Myös järjestelmän käytettävyyteen olisi hyvä kiinnittää huomiota jo suunnittelun alkuvaiheessa, kun mahdolliset ongelmakohdat on vielä helppo kiertää. Testausuuniin tulisi päästä esteettömästi käsiksi, ja testattavia tuotteita ja testipiirilevyjä pitäisi pystyä helposti vaihtamaan.

Testijärjestelmä koostuu kolmesta perusosasta. Ensimmäinen osa on testipiirilevy, jolle testattavat tuotteet asennetaan. Piirilevy tuotteineen ja oheiskomponentteineen asetetaan esimerkiksi testiuuniin, kun kyseessä on eri lämpötila-alueita kattava testi. Huoneenlämpötilassa suoritettava testi tehdään luonnollisesti ilman uunia. Uunin ulkopuolelle sijoitettava mittauselektroniikka on järjestelmän toinen perusosa. Se tuottaa testattaville tuotteille tarvittavat käyttöjännitteet, sekä kerää haluttuja tietoja tuotteiden toiminnasta koko testin ajan. Tuotteiden ja mittauselektroniikan välinen yhteys hoidetaan kolmannella perusosalla, kaapeloinnilla. Kaapeloinnin voi joissain tapauksissa korvata emolevyllä.

Testeissä tuotteet yleensä esijännitteistetään koko testin ajaksi, ja niiltä mitataan esimerkiksi nollapistepoikkeaman (offset) muutosta ja luetaan tuotteen lähettämää mittaustietoa, kiihtyvyyssanturin tapauksessa tietysti mitattua kiihtyvyyttä. Toimivan testijärjestelmän olisi siis kyettävä tuomaan testattaville kiihtyvyyssantureille jännite, ja välittämään mitattu kiihtyvyystieto uunin ulkopuolelle. Uuniin olisi tärkeää saada mahdollisimman monta tuotetta yhtäaikaisesti mahdollisimman suuren testikyvykkyyden saavuttamiseksi.

Jos antureilta halutaan mitata testin aikana myös kiihtyvyyden muutosta, tulisi uunin sisällä olla sopiva asennusteline. Telinettä täytyy kyetä kääntämään testin aikana, jotta antureilta voidaan lukea erilaisia kiihtyvyystietoja. Vaikka testissä keskityttäisiinkin

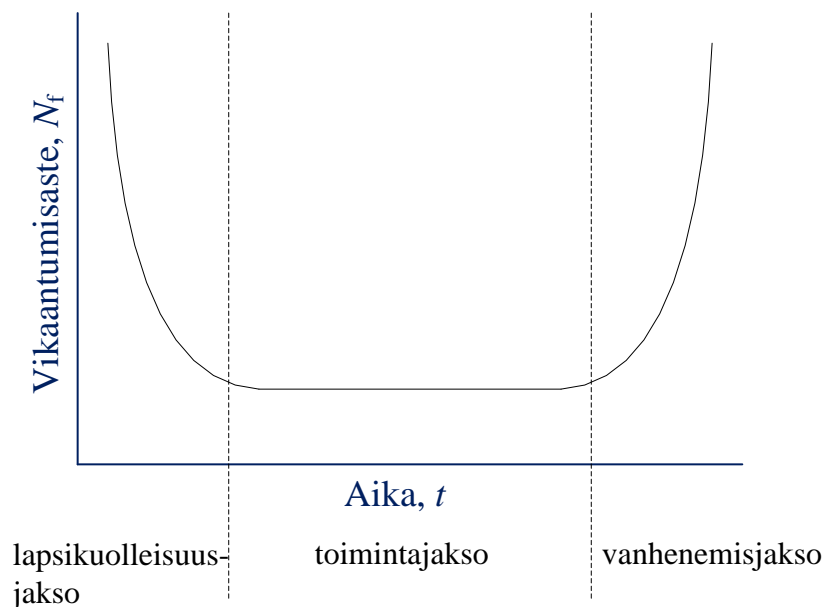
pelkän poikkeaman muutoksen tarkkailuun, olisi testilevy silti hyvä kiinnittää uunissa jonkinlaiseen telineeseen, sillä se mahdollistaa kääntelyn lisäksi lämmön tasaisemman jakautumisen levyn ja testattavien tuotteiden ympärille. Näin voidaan taata tasainen rasitus jokaiselle testin läpikäyvälle tuotteelle, ja parannetaan samalla testin toistettavuutta.

Elektroniikkatuotteille tehtävät testit [8] voidaan jakaa kahteen ryhmään: luotettavuustesteihin ja laadunvarmistustesteihin. Luotettavuustestejä käytetään tuotteiden kehitysvaiheessa, sillä näiden testien tarkoituksena on etsiä tuotteiden helposti vikaantuvia osia ja niissä ilmenneitä vikamoodeja. Löydösten perusteella vauriot aiheuttaneet vikamekanismit tunnistetaan, ja niihin johtaneet juurisyyt pyritään poistamaan tuotteen seuraavasta kehitysversiona. Luotettavuustestien avulla voidaan myös arvioida tuotteen elinikää. Laadunvarmistustestit puolestaan tehdään valmiille tuotteille ennen asiakkaalle lähettämistä. Laadunvarmistustestien avulla voidaan esimerkiksi varmistaa yksittäisen tuoterän laatu, tai testin avulla voidaan etsiä erän heikkoja yksilöitä. Seuraavaksi esitellään tarkemmin eri tyyppisiä luotettavuus- ja laadunvarmistustestejä.

2.3.1 Luotettavuustestit

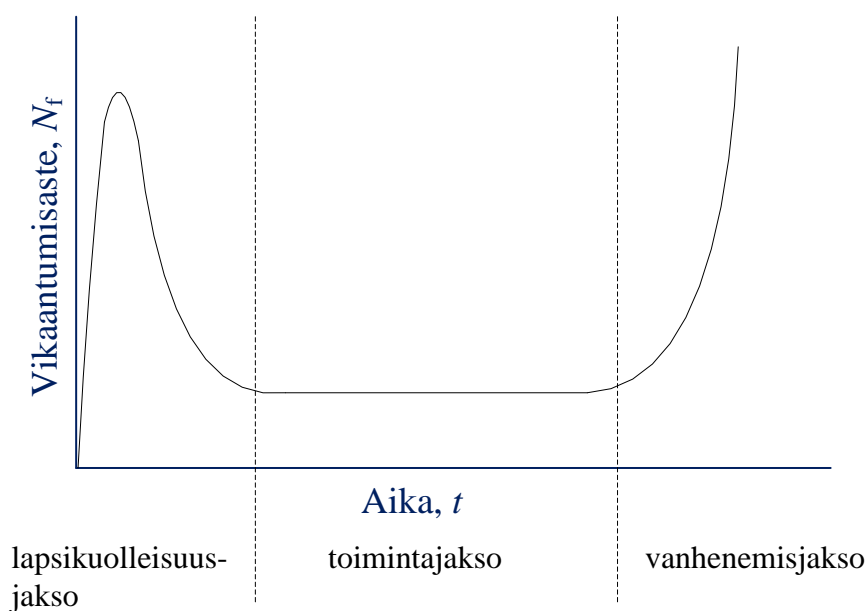
Luotettavuus [9] on yksi tärkeimmistä elektroniikkatuotteen ominaisuuksista, vaikka termille luotettavuus ei ole olemassa yksiselitteistä määritelmää. Luotettavuus voidaan määritellä esimerkiksi tilastotieteen, asiakkaan tai valmistajan näkökulmasta. Asiakkaan näkökulmasta tuote on luotettava, jos se toimii kuten tuotteen käyttäjä olettaa sen toimivan, ja vikaantuu vasta sille ominaisen toiminta-ajan kuluttua. Tuotteen valmistajan näkökulmasta luotettavuus on tuotteen kyky toimia sille määriteltyjen olosuhteiden alaisuudessa määritellyn toiminta-ajan verran niin, että sen suorituskyky säilyy määriteltyjen rajojen sisällä tuotteen vikaantumatta.

Tilastotieteen näkökulmasta katsottuna luotettavuus voidaan määritellä tuote-erän vikaantumisasasteen kautta. Valmiiden komponenttien elinikäjakaumaa, eli vikaantumisasastetta N_f käyttöajan t suhteen kuvataan niin kutsutulla kylpyammekäyrällä [10], joka on havainnollistettu kuvassa 6. Heti käyttöönoton jälkeen tuotteiden vikaantumisasaste on nopeaa, sillä valmistusvikaiset, heikot tuotteet rikkoontuvat käytössä nopeasti. Tätä ilmiötä kutsutaan lapsikuolleisuudeksi. Vikaantumisen aste laskee heikkojen yksilöiden poistuessa käytöstä, ja saavuttaa lopulta vakionopeuden. Tämä vakionopeus on jokaiselle erälle ominainen luotettavuus. Ajan kuluessa vikaantumisen aste alkaa taas kasvaa, kun ylitetään tuotteille ominainen elinikä. Tuotteiden vanhentuessa niitä rikkoontuu lopulta yhtä nopeasti kuin elinajan alussa.



Kuva 6: Kylpyammekäyrä. Muokattu lähteestä [10].

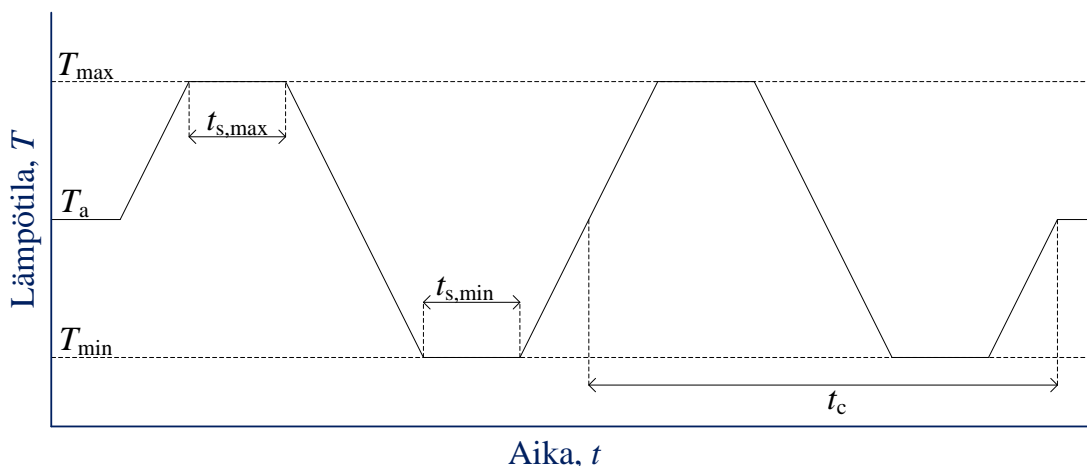
Edellä kuvattua kylpyammekäyrää voidaan kutsua perinteiseksi kylpyammekäyräksi. Modernien mikroelektroniikan komponenttien elinikäjakauman on katsottu noudattavan paremmin niin kutsuttua yleistettyä kylpyammekäyrää [10]. Kuvassa 7 esitetty yleistetty kylpyammekäyrä poikkeaa perinteisestä kylpyammekäyrästä siten, että alun lapsikuolleisuusjaksoon kuuluu sekä nousevan että laskevan vikaantumisasasteen vaihe. Tämä tarkoittaa, että komponenttien vikaantumisasasteen katsotaan alkavan nolosta, ja nousevan sieltä nopeasti maksimiarvoonsa. Maksimiarvon jälkeen vikaantumisasaste kääntyy laskuun, kuten perinteisessä kylpyammekäyrässä. Toimintajakson ja vanhenemisjakson osalta käyrät ovat identtiset.



Kuva 7: Yleistetty kylpyammekäyrä. Muokattu lähteestä [10].

Luotettavuustesti on keino etsiä tuotteen heikkoja kohtia. Testin tavoitteena on vikojen kiihdytetty aikaansaaminen altistamalla tuote sen odotettuja käyttöolosuhteita kovemmalle rasitukselle. Voidaankin sanoa, että luotettavuustesti on epäonnistunut, jos yhtään vikaa ei saada tuotteissa esiin. Rasituksen aikaansaamiseksi tuote voidaan testeissä altistaa esimerkiksi lämpötilan vaihteluille eli sykleille, nopeille lämpötilasokeille, kosteudelle tai tärinälle. Tuotetta voidaan myös rasittaa syöttämällä siihen tehoa syklisesti. Yleisimpinä standardoituina luotettavuustesteinä voidaan mainita lämpösyklitesti (temperature cycling) [11], lämpösokkitesti (thermal shock) [12], tehosyklitesti (power cycling) [13] ja tärinäsookkitesti (mechanical shock) [14]. Rasituksen jälkeen tuotteessa ilmenneet viat analysoidaan. Viat voivat olla konkreettisia tuotteen jonkin osan vauriota, tai tuotteen toimintavirheitä. Vaurioanalyysin lisäksi luotettavuustestien tuloksista voidaan arvioida tuotteiden todellista elinikää. Elinikäarviota varten luotettavuustestille on määriteltävä sille tyypillinen kiihdytyskerroin (acceleration factor) [15]. Kiihdytyskertoimen avulla tuotteen eliniästä luotettavuustestin aikana voidaan laskea arvio tuotteen todelliselle eliniälle.

Esitellään seuraavaksi tarkemmin yksi yleisimmin käytetyistä luotettavuusteisteistä, lämpösyklitesti. Kuvassa 8 on esimerkki lämpösyklitestin lämpötilaprofiilista [11]. Kuvaan on merkitty ne testin aika- ja lämpötilamuuttujat, joiden avulla erilaiset syklitestit määritellään. Lämpösyklitesti aloitetaan huoneenlämpötilasta T_a , josta lämpötila nostetaan tasaisella nopeudella kohti testin maksimilämpötilaa T_{max} , joka on yleensä huomattavasti testattavalle tuotteelle määriteltyä maksimikäyttölämpötilaa korkeampi piilevien vikojen helposti esiin saamiseksi. Maksimilämpötilassa lämpötilaa pidetään vakiona ajan $t_{s,max}$ verran, minkä jälkeen lämpötilaa lasketaan tasaisella nopeudella testin minimilämpötilaan T_{min} saakka. Myös minimilämpötila on tavallisesti huomattavasti tuotteelle määriteltyä minimikäyttölämpötilaa matalampi. Minimilämpötilassa pysytään ajan $t_{s,min}$ verran, minkä jälkeen lämpötilaa nostetaan tasaisella nopeudella kohti aloituslämpötilaa T_a . Näin on suoritettu yksi kokonainen toisto, jonka kesto yhteensä on t_c . Näitä toistoja suoritetaan peräjälkeen testin aikana niin monta, kuin etukäteen on määritely. Kuvan 8 esimerkissä toistojen määrä on kaksi. Standardeissa, esimerkiksi [11], on listattu erilaisia arvoja edellä luetelluille lämpötiloille, ajoille ja toistojen määrittelyille, jotka riippuvat kulloisenkin testin tarkoituksesta. Myös esimerkiksi komponenttivalmistajilla voi olla omia sisäisiä standardeja, joiden mukaan lämpösyklitestin määrittely valitaan. Valituista testimäärittelyistä huolimatta lämpösyklitestin on aina tarkoitus simuloida tuotteen käyttöä kiihdytetysti vikojen nopeamman esiintyvyyden takaamiseksi. Valituilla arvoilla ei siis pyritä matkimaan tuotteen normaalia käyttöympäristöä. Lämpösyklitestin jälkeen testatuissa tuotteissa ilmenevät vauriot analysoidaan ja pyritään torjumaan uusista tuotteista.



Kuva 8: Tyypillisen lämpösyklistestin lämpötilaprofiili, jossa toistojen lukumäärä on kaksi. Muokattu lähteestä [11].

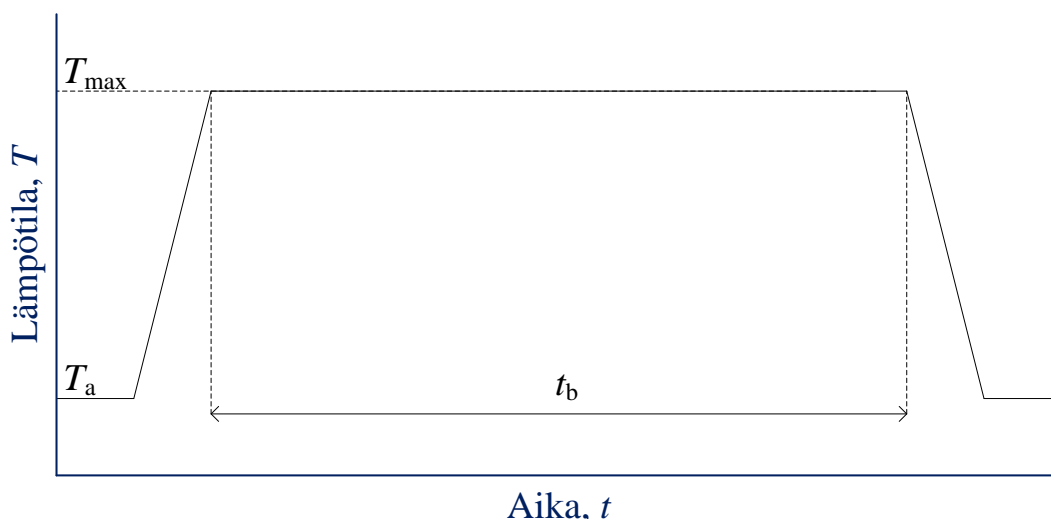
2.3.2 Laadunvarmistustestit

Laadunvarmistustestien tavoitteena on poistaa valmistusvikaiset tuotteet erästä, jolloin vikaantumisen aste asiakkaalle lähetettävissä tuote-erissä olisi heti kylpyammekäyrän toimintajakson alueella. Kuten luotettavuustestin, myös laadunvarmistustestin tarkoitus on kiihdyttää vaurioiden syntyä, mutta nyt tavoitteena on vain löytää lapsikuolleisuusjakson aikana vikaantuvat tuotteet. Vaurioiden esiintymisen kiihdytys saadaan aikaan altistamalla tuotteet esimerkiksi korkealle lämpötilalle. Luotettavuustesteistä poiketen testattavat tuotteet esijännitettään lähes aina laadunvarmistustestien ajaksi, mikä entisestään auttaa valmistusvikaisten tuotteiden tunnistamista. Yksi yleisimmistä standardoiduista laadunvarmistustesteistä on sisäänajovanhennustesti (burn-in) [16] [17].

Tarkastellaan vielä lähemmin sisäänajovanhennustestiä. Jatkossa vanhennustestillä viitataan sisäänajovanhennustestiin, ellei toisin mainita. Vanhennustestin tehokkuus edellyttää, että vanhennettävien komponenttien elinikäjakauma noudattaa kylpyammekäyrää [18]. Vanhennustesti ei vaikuta yksittäisten tuotteiden elinikään eikä muuta erän elinikäjakaumaa, vaan se siirtää jakaumaa vasemmalle aika-akselilla poistamalla lapsikuolleisuusjakson aikana vikaantuvat komponentit. Käytännössä vanhennustesti ei kykene eliminoimaan kaikkia varhain vikaantuvia tuotteita. Vanhennettun erän elinikäjakauma noudattaa katkaistua kylpyammekäyrää, jossa lapsikuolleisuusjakso on tavallista lyhyempi ja vikaantumisen aste ajanhetkellä nolla on lähellä toimintajakson vikaantumisasetta.

Kuvassa 9 on esitetty korkean lämpötilan vanhennustestin tyypillinen lämpötilaprofiili [16]. Vanhennustesti alkaa huoneenlämpötilasta T_a , josta nousee tasaisesti testilämpötilaan T_{max} . Testilämpötilana käytetään yleensä korkeinta testattavalle tuotteelle määritettyä käyttölämpötilaa, tai hieman sitä korkeampaa. Vanhennuksen kesto t_b on esimerkiksi 12–24 tuntia, jonka jälkeen lämpötila lasketaan takaisin huoneenlämpöön. Vanhennustesti on hyväksymistesti, joten se suoritetaan jokaiselle tuotteelle vain kerran. Testin tarkoituksena on simuloida tuotteen normaalia käyttöä. Jos testattava tuote toimii

normaalisti vanhennuksen jälkeen, voidaan se todeta hyväksi. Jos tuote vikaantuu tai käyttäytyy normaalista poikkeavasti, se hylätään. Tässä työssä suunniteltavaa testipiirilevyä on tarkoitus käyttää vanhennustestissä.



Kuva 9: Tyypillisen vanhennustestin lämpötilaprofiili.

2.4 Testipiirilevyille asetettavat vaatimukset

Tässä työssä suunniteltavalla testipiirilevyllä tullaan testaamaan porauksenaikaiseen mittaussovellukseen tarkoitettuja kiihtyvyyssanturituotteita vanhennustestissä, jonka kesto t_b on määritelty 24 tuntia ja maksimilämpötilaksi T_{max} 200 °C. Vanhennustestin määritteiden perusteella testipiirilevyn tulee siis kestää vähintään 200 °C lämpötilaa 24 tuntia kerrallaan vikaantumatta. Levyssä käytettävät materiaalit ja oheiskomponentit on valittava siten, että ne eivät rajoita haluttua maksimilämpötilaa. Ihanteellisessa tilanteessa valitut materiaalit kestäisivät käyttöä jopa hieman tavoitelämpötilaa korkeammassa lämmössä. Levyille täytyy voida asentaa testattava kiihtyvyyssanturituote helposti, ja tuotteita pitää pystyä vaihtamaan. Tavoitteena on suunnitella testipiirilevy, jolle voidaan asentaa mahdollisimman monta testattavaa tuotetta niin, että levy on yhteensopiva jo jonkin olemassa olevan mittauselektroniikan kanssa. Loppukäytössä levy tullaan asentamaan testiuniin, joten levyn mitoituksessa on otettava huomioon uunin mitat ja mahdollinen uunin sisäinen kiinnitysteline.

Tämän työn testien tavoitteena on päästä kokeilemaan toteutetun testipiirilevyn kestoja uunissa 200 °C lämpötilassa. Tarkoituksena on varmistaa, toimivatko levyn ratkaisut konseptitasolla. Varsinainen levyn elinikätestaus ei kuulu tämän työn tavoitteisiin.

3 Testipiirilevyssä esiintyvät materiaalit

Sisäänajovanhennustestiin soveltuva testipiirilevy koostuu paljaan piirilevyn lisäksi sille asetettavista testikannoista, liittimistä, passiivikomponenteista kuten kondensaattoreista, ja juotteesta, jonka avulla kaikki luetellut osat voidaan kiinnittää toisiinsa. Näissä osissa käytetään erilaisia eristäviä ja johtavia materiaaleja. Paljaassa piirilevyssä esiintyvä eristävä laminaatti, kuten epoksiharts, polymeeri tai keraami, juote, kondensaattoreissa esiintyvät dielektriset materiaalit sekä komponenteissa käytettävät muovit ja metalliseokset ovat kaikki tärkeitä testipiirilevyyn kuuluvia materiaaleja, joilla on toisistaan poikkeavia mekaanisia ominaisuuksia. Tässä luvussa tarkastellaan näiden materiaalien tärkeimpiä ominaisuuksia, sekä käyttäytymistä erityisesti korkeassa lämpötilassa. Aluksi tutustutaan jännitys-venymäkäyrään, jonka muotoa tarkastelemalla kaikkien lueteltujen testipiirilevy materiaalien muutamia mekaanisia ominaisuuksia voidaan tutkia. Alaluvuissa keskitytään yhteen testipiirilevyn osaan kerrallaan, ja tutustutaan tarkemmin korkean lämpötilan näille materiaaleille aiheuttamiin ongelmiin. Lisäksi esitellään ilmiöitä korkeaa lämpötilaa hyvin kestävien materiaalien taustalta.

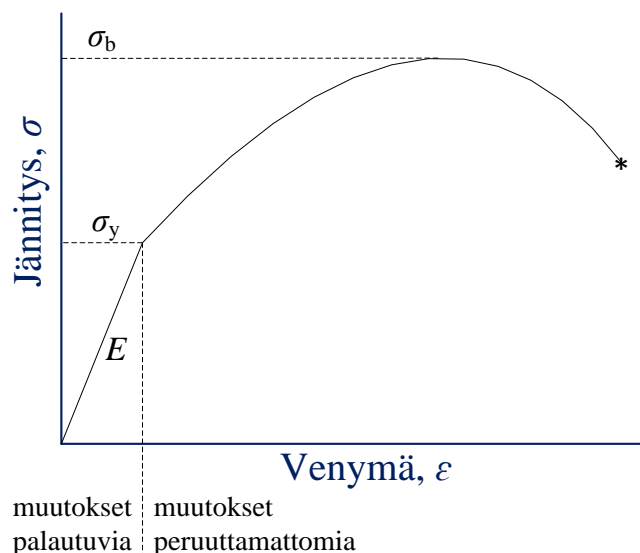
Muutamia materiaalien mekaanisia ominaisuuksia voidaan tutkia jännitys-venymäkäyrältä [19], joka on esitetty kuvassa 10. Jännitys-venymäkäyrä kuvaa materiaalinäytteen venymää siihen kohdistetun jännityksen suhteen. Useimmiten jännitys-venymäkäyrä määritetään materiaalin vetokokeella, jossa materiaalinäytteeseen kohdistetaan vetävä voima, ja kirjataan ylös näytteen nimellisvenymä (engineering strain) nimellisjännityksen (engineering stress) suhteen. Jännitys-venymäkäyrälle merkitty nimellisjännitys σ_n määritellään

$$\sigma_n = \frac{F_t}{A_0}, \quad (5)$$

missä F_t on materiaalinäytettä vetävä voima ja A_0 on vetävää voimaa kohtisuorassa oleva näytteen alkuperäinen poikkipinta-ala [19]. Nimellisvenymä ε_n puolestaan määritellään

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (6)$$

missä l on näytteen pituus, l_0 on näytteen alkuperäinen pituus ja Δl havaittu pituuden muutos [19].



Kuva 10: Jännitys-venymäkäyrä. σ_y on materiaalin myötölujuus, σ_b on materiaalin murtolujuus ja E on materiaalin kimmokerroin. Muokattu lähteestä [19].

Jännitys-venymäkäyrä voidaan jakaa kahteen toiminnalliseen osaan, palautuvien eli elastisten ja peruuttamattomien eli plastisten muutoksien alueeseen. Palautuvien muutoksien alueella jännityksen aiheuttama venymä on lineaarista, ja käyrän kulmakertomesta voidaan määrittää materiaalin kimmokerroin E (Young's modulus). Elastisella alueella siis pätee

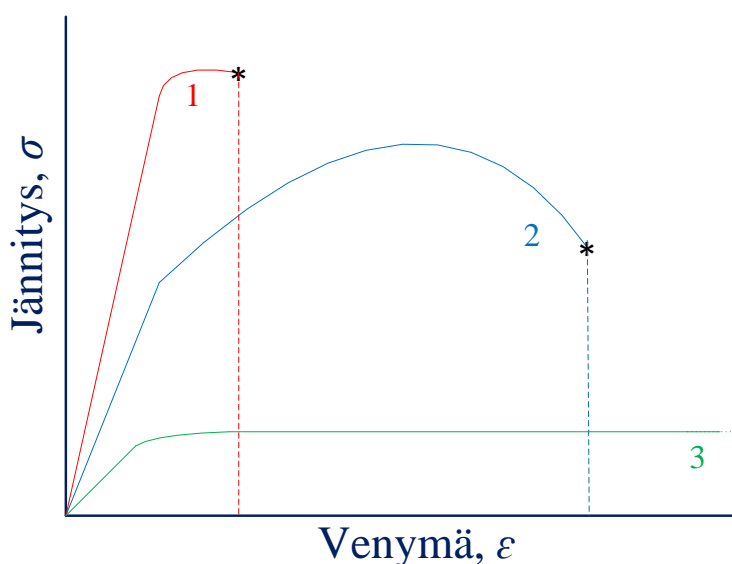
$$\sigma_n = E \varepsilon_n, \quad (7)$$

eli materiaalin venymä noudattaa Hooken lakia [19]. Saavutettuaan myötölujuuden σ_y , materiaali alkaa myödetä, eli tästä eteenpäin materiaalin rakenteelle tapahtuvat muutokset ovat peruuttamattomia, eikä Hooken laki ole enää voimassa. Käyrän huippua kutsutaan murtolujuudeksi σ_b (ultimate tensile strength, UTS), mistä eteenpäin materiaali alkaa kuroutua, eli sinne syntyy mikromurtumia. Murtolujuus on maksimivetojännitys, jonka materiaali kestää. Kuroutumisen alkaessa venymän kasvattamiseen tarvittava jännitys pienenee. Lopulta jännitys-venymäkäyrä päättyy materiaalin lopulliseen murtumiseen.

Kuvassa 10 esitettyä jännitys-venymäkäyrää voidaan myös kutsua insinöörivenymäkäyräksi, sillä siihen merkityt jännitys- ja venymäarvot ovat todellisten arvojen sijaan nimellisarvoja. Nimellisarvoissa vertailukohtana käytetään alkuperäisiä poikkipinta-alan ja pituuden arvoja, kun taas todellisessa jännityksessä ja venymässä käytetään referenssinä sen hetkisiä arvoja. Insinöörivenymäkäyrästä on helpompi lukea esimerkiksi murto- ja myötölujuuden arvoja kuin todellisten jännityksen ja venymän määrittelemästä käyrästä, ja se on siksi todellista jännitys-venymäkäyrää yleisemmin käytössä.

Jännitys-venymäkäyrän muodosta voidaan lukea arvioita muun muassa materiaalin lujuudesta, venyvyydestä ja sitkeydestä. Kuvassa 11 on esimerkkejä ominaisuuksiltaan

erilaisten materiaalien jännitys-venymäkäyristä. Materiaali on luja, jos sen lineaarisen venyvyyden jakso on pitkä, kuten kuvan 11 käyrillä 1 ja 2. Venyvän materiaalin epälineaarinen peruuttamattomien muutosten jakso käyrällä on pitkä, kuten kuvan 11 käyrillä 2 ja 3. Venyvän materiaalin vastakohta on hauras materiaali, joka murtuu lähes ilman plastista muodonmuutosta kuten kuvan 11 materiaali 1. Sitkeys puolestaan määritellään jännitys-venymäkäyrän kattamasta pinta-alasta, mitä suuremman pinta-alan käyrä rajaa, sitä sitkeämpi materiaali on. Sitkeys on siis materiaalin lujuuden ja venyvyyden tulo. Materiaalin kovuus kertoo sen kyvystä vastustaa muodonmuutosta, eikä sitä voida suoraan päätellä jännitys-venymäkäyrän muodosta. Kuvassa 11 esitetyt jännitys-venymäkäyrät voisivat kuulua esimerkiksi keraamille (käyrä 1), metallille (käyrä 2) ja polymeerille (käyrä 3). On kuitenkin tärkeä muistaa, että esitetyt käyrät ovat pelkistettyjä esimerkkejä, ja todellisten materiaalien jännitys-venymäkäyrät eivät ole näin selkeitä.



Kuva 11: Erilaisten materiaalien jännitys-venymäkäyriä. Materiaali 1 on luja, sen venyvyys on huono ja se ei ole sitkeä. Materiaali 2 on luja, venyvä ja sitkeä. Materiaali 3 on heikko, venyvä ja kohtuullisen sitkeä. Muokattu lähteestä [19].

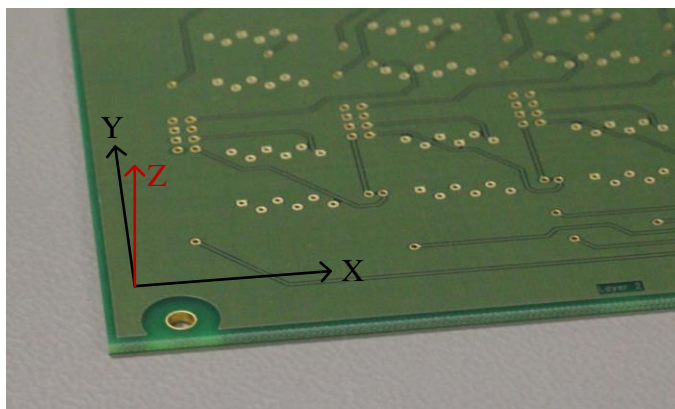
Materiaalille määritetty jännitys-venymäkäyrä voi myös muuttua muotoaan, sillä materiaalin mekaaniset ominaisuudet voivat muuttua materiaalin altistuessa erilaisille olosuhteille. Korkea lämpötila on hyvä esimerkki olosuhteesta, jonka seurauksena materiaalin mekaaniset ominaisuudet muuttuvat, ja joka täten saa materiaalin jännitys-venymäkäyrän muodon muuttumaan. Myötölujuuden σ_y aleneminen on tyypillistä yleisesti käytössä olevalle tina-hopea-kupari-juotteelle (SnAgCu, SAC) [20] [21], jonka jännitys-venymäkäyrä on kuvan 11 käyrän 2 mallinen. Korkeassa lämpötilassa SAC-juotteen jännitys-venymäkäyrä olisi siis huoneenlämmössä määritettyä käyrää matalampi alentuneen myötölujuuden vuoksi. Myös keraameilla voidaan havaita myötölujuuden lasku korkeassa lämpötilassa [22]. Paljaassa piirilevyssä eristeenä käytettyjen epoksihartsin ja polyimidin kimmokertoimen E on mitattu laskevan lasitransformaatiolämpötilan ylityksen jälkeen, mikä tarkoittaa jännitys-venymäkäyrän lineaarisen osan loiventumista.

3.1 Paljas piirilevy

Tässä aluvuussa keskitytään paljaan piirilevyn eristemateriaalien esittelyyn. Aluksi käydään läpi piirilevyn rakennetta, jotta nähdään missä eristäviä materiaaleja käytetään piirilevyssä. Tavallinen paljas piirilevy [15] koostuu kolmesta pääkomponentista, jotka ovat

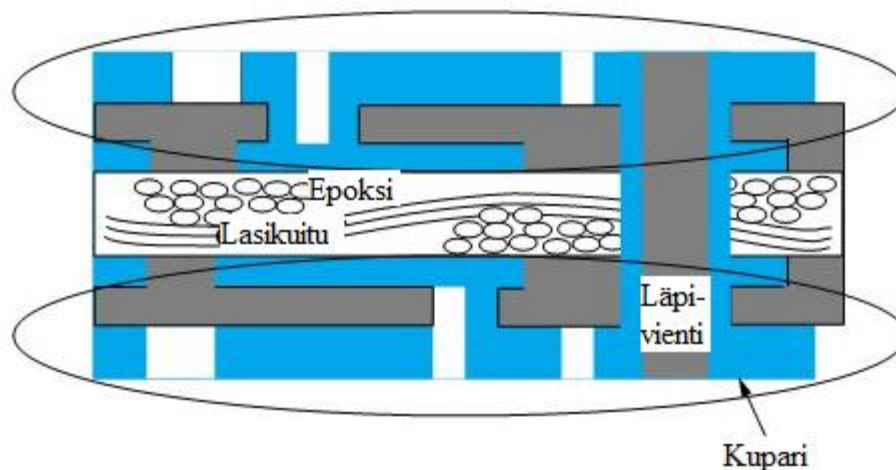
- orgaaninen hartsi,
- epäorgaaninen täyteaine ja
- kuparijohdin.

Luetelluista komponenteista hartsi ja täyteaine muodostavat eristeen kuparijohdinkerrosten välille. Eristekerros toimii samalla myös tukikerroksena johtimille. Valitun eristeen on oltava mekaanisesti vahva ja kestävä suunnitellut prosessointi- ja käyttölämpötilat. On myös tärkeää, että koko piirilevyrakenteen erityisesti Z-suuntainen lämpölaajenemiskerroin (CTE, coefficient of thermal expansion) on mahdollisimman lähellä kuparin lämpölaajenemiskerrointa 17 ppm/K, jotta esimerkiksi levyllä olevat kuparoidut läpiviennit kestäisivät lämmön aiheuttaman laajenemisen rikkoutumatta. Kuvassa 12 on esimerkki tavallisesta kaksikerroksisesta piirilevystä.



Kuva 12: Tavallinen kaksikerroksinen piirilevy, jossa näkyy signaalivetoja, läpivientejä ja kuparikaato.

Epoksi-lasikuitupohjainen FR-4 (flame retardant) [15] [23] on yleisimmin käytössä oleva piirilevymateriaali. FR-4:n sähköiset, kemialliset sekä mekaaniset ominaisuudet täyttävät useimpien sovellusten tarpeet, mikä on nostanut sen suosituimmaksi materiaaliksi piirilevyjen valmistuksessa. Kuvasta 13 nähdään, kuinka epoksihartsi ja lujittavana täyteaineena käytetty lasikuitu muodostavat FR-4 -pohjaisen substraatin perusrakenteen. Pitkät verkkomaiseksi rakenteeksi kudotut lasikuidut täyttävät koko epoksihartsisubstraatin. Lasikuitujen kudonta rajoittaa valmiin levyn lämpölaajenemista XY-tasossa, mikä ehkäisee lämpölaajenemisesta aiheutuvia murtumisvaurioita tässä tasossa. Kuitenkin Z-suunta on vapaa lämmön aiheuttamalle laajenemiselle. Tyypillinen lämpölaajenemiskerroin FR-4:lle XY-tasossa on noin 13–16 ppm/K, kun taas Z-suuntainen lämpölaajenemiskerroin on huomattavasti suurempi, noin 70 ppm/K [24].



Kuva 13: FR-4:n poikkileikkaus. Muokattu lähteestä [15].

Polyimidi-lasikuitupohjainen substraatti [15] [25] on yleisin vaihtoehto FR-4:lle korkeamman lämpötilan sovelluksissa. Rakenteeltaan ja poikkileikkaukseltaan se muistuttaa suuresti FR-4:ää. Polyimidisubstraatit ovat FR-4 -pohjaisia levyjä kalliimpia, minkä takia polyimidipohjainen levy valitaan vain silloin, kun FR-4:n ominaisuudet eivät enää riitä sovelluskohteen tarpeisiin. Polyimidistä on mahdollista tehdä myös joustavia piirilevyjä jättämällä lasikuituvahvike pois, tai käyttämällä sen sijaan esimerkiksi kvartsijauhetta rakenteen täyteenä. Polyimidipohjaisen levyn XY-suuntainen lämpölaajenemiskerroin on noin 13–14 ppm/K, ja Z-suuntainen noin 55 ppm/K [26]. Polyimidi siis laajenee Z-suunnassa huomattavasti FR-4:ää vähemmän, mikä tekee siitä luotettavamman materiaalin korkeissa lämpötiloissa käytettäväksi. Eräässä tutkimuksessa [27] osoitettiin, että myös piirilevymateriaalin mekaaniset ominaisuudet, kuten CTE ja kimmokerroin, vaikuttavat suoraan juoteliitoksien luotettavuuteen. Erityisesti korkeissa lämpötiloissa polyimidipohjaisen piirilevyn todettiin tarjoavan FR-4:ää luotettavamman alustan tinapohjaiselle SAC-juotteelle.

Kolmas tunnettu piirilevymateriaali on keraami-lasikuitupohjainen substraatti [28] [29]. Keraamipohjaisia levyjä käytetään tyypillisesti korkean taajuusalueen sovelluksiin, sillä ne ovat FR-4:ää ja polyimidiä huomattavasti stabiilimpia eristeitä. Imeytyessään substraattiin vesi kykenee muuttamaan FR-4:n ja polyimidin permittiivisyyttä. Keraamipohjainen levy ei ime itseensä juuri ollenkaan kosteutta, joten sen permittiivisyys pysyy vakiona ympäristön olosuhteista riippumatta. Useimmat keraamilevyt kestävät myös hyvin kuumuutta. Keraamipohjaisen levyn XY-suuntainen lämpölaajenemiskerroin on noin 10–12 ppm/K, ja Z-suuntainen noin 32 ppm/K [28], eli tässä esitellyistä piirilevymateriaaleista se on lämpölaajenemiskäyttäytymiseltään paras vaihtoehto korkeaan lämpötilaan.

Materiaalin lasitransformaatiolämpötila T_g [15] [19] kertoo nimensä mukaisesti, missä lämpötilassa amorfinen materiaali, eli epäorgaaninen lasi tai orgaaninen polymeeri, muuttuu hauraasta pehmeäksi. Lasitransformaatiolämpötilassa muun muassa materiaalin

lämpölaajenemiskerroin ja sen myötä tilavuus muuttuvat radikaalisti, eli voidaan katsoa, että materiaalin rakenteesta tulee tällöin epävakaata. Tämä tekeekin lasitransformaatiolämpötilasta erittäin tärkeän materiaaliominaisuuden, sillä esimerkiksi piirilevyissä käytetyt materiaalit ovat yleisimmin amorfisia. Elektroniikkakokoonpanossa käytettyjen materiaalien lasitransformaatiolämpötilat määrittelevät teoreettisen ylärajan lämpötilalle, jonka jälkeen kokoonpanosta tulee epäluotettava. Paljaissa piirilevyissä käytettyjen eristemateriaalien kohdalla hyvänä sääntönä voidaan pitää, että käyttölämpötilan pitäisi olla vähintään 25 °C alempi kuin kokoonpanon alin lasitransformaatiolämpötila [30], jotta kokoonpanon stabiilius voidaan taata.

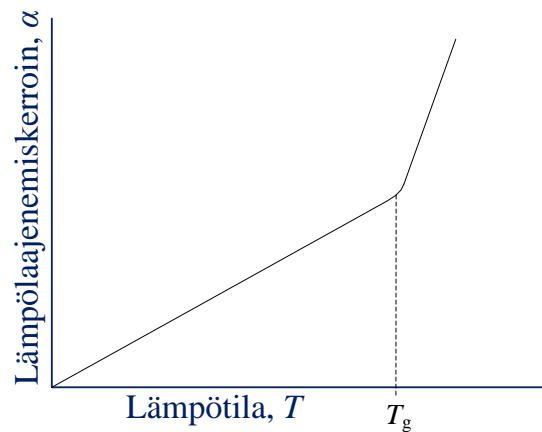
FR-4:n lasitransformaatiolämpötilan on esitetty eri lähteissä olevan noin 135 °C [15] [25] [30]. FR-4:n maksimikäyttölämpötila lasitransformaatiolämpötilan perusteella on siis noin 110 °C. Saatavilla on myös korkean lämpötilan FR-4-substraatteja, joiden T_g on noin 170 °C [23]. Polyimidipohjainen piirilevy onkin huomattavasti parempi valinta korkean lämpötilan sovelluksiin, sillä sen lasitransformaatiolämpötila on huomattavasti FR-4:ää korkeampi, noin 250 °C [15] [30], mikä mahdollistaa jopa 225 °C:n käyttölämpötilan. Myös keraamipohjainen piirilevy on hyvä vaihtoehto korkean lämpötilan sovelluksiin, sillä sen lasitransformaatiolämpötilaksi on esitetty jopa yli 280 °C [28].

Taulukkoon 1 on koottu edellä esiteltyt olennaiset eri paljaan piirilevyn eristemateriaalien ominaisuudet.

Taulukko 1: Eri piirilevymateriaalien ominaisuuksia.

Piirilevymateriaali	CTE, XY [ppm/K]	CTE, Z [ppm/K]	T_g [°C]	Maksimikäyttö- lämpötila [°C]
FR-4 (Isola DE104)	13–16	70	135–170	110–145
Polyimidi (Isola P95)	13–14	55	250	225
Keraami (Rogers RO4350B)	10–12	32	280	255

Kuvassa 14 on havainnollistettu materiaalin lämpölaajenemiskäyttäytymistä lasitransformaatiolämpötilan ylä- ja alapuolella. Lasitransformaatiolämpötilan alapuolella amorfisen materiaali laajenee lämmitettäessä lämpölaajenemiskertoimensa mukaisesti. Kerroin on tällöin verrannollien saman aineen kiteisen muodon lämpölaajenemiskertoimeen. Kun lasitransformaatiolämpötila saavutetaan, amorfisen materiaalin lämpölaajenemiskerroin kasvaa nopeasti, ja vakiintuu verrannolliseksi saman aineen nestemäisen muodon lämpölaajenemiskertoimeen. Piirilevymateriaalin lämpölaajenemiskertoimen nopea kasvu lasitransformaatiolämpötilan yläpuolella voi johtaa esimerkiksi kuparijohdinten vaurioitumiseen tai paljaan piirilevyn taipumiseen, minkä vuoksi piirilevyn altistamista lasitransformaatiolämpötilansa yläpuolelle tulisi välttää normaaleissa käyttöolosuhteissa.



Kuva 14: Lasitransformaatiolämpötilan vaikutus materiaalin lämpölaajenemiskertoimeen. Muokattu lähteestä [19].

Materiaalin lasitransformaatiolämpötila ei ole vakio, vaan se voi muuttua materiaalin altistuessa esimerkiksi korkealle lämpötilalle tai kosteudelle. Useammassa tutkimuksessa [23] [31] on kartoitettu FR-4-laminaatin lasitransformaatiolämpötilan muuttumista korkean lämpötilan seurauksena. Sulatusjuotos (reflow) on yleisin pintaliitoskomponenttien liitostapa. FR-4:n lasitransformaatiolämpötilan ollessa 135–170 °C altistuvat siitä valmistetut piirilevyt lähes poikkeuksetta lasitransformaatiolämpötilaansa korkeammalle lämpötilalle, sillä sulatusjuotosprosessissa (reflow soldering process) käytetyt lämpötilat ovat tyypillisesti yli 200 °C juotteen hyvän kostumisen mahdollistamiseksi.

Kolmea eri FR-4-laminaattia [23], joiden lasitransformaatiolämpötilat olivat vastaavasti korkealta, matalalta ja keskitason alueelta, altistettiin kolmella eri tavalla korkealle lämpötilalle. Ensimmäinen altistustapa oli kolmelle sulatusjuotosprosessille, toinen kuudelle sulatusjuotokselle, ja kolmas kahdelle sulatusjuotokselle ja yhdelle aaltojuotosprosessille. Sulatusjuotosprosessin maksimilämpötila 243 °C oli kaikissa tapauksissa korkeampi, kuin näytteiden alkuperäinen lasitransformaatiolämpötila. Korkean ja keskitason T_g :n laminaattien lasitransformaatiolämpötila laski kaikilla kolmella altistustavalla siten, että suurempi sulatusjuotosprosessien määrä merkitsi suurempaa T_g :n pudotusta kontrolliarvosta. Matalan T_g :n laminaatin lasitransformaatiolämpötila puolestaan nousi kaikilla kolmella altistustavalla. Kaikista suurimman variaation lasitransformaatiolämpötilassaan koki korkean T_g :n FR-4-laminaatti. Pääteltiin, että korkean T_g :n laminaatti oli absorboinut nestettä sulatusjuotoksen aikana, mikä johtaisi sen lasitransformaatiolämpötilan laskuun. Päätelmän varmistamiseksi sekä korkean että keskitason lasitransformaatiolämpötilan laminaatteja, jotka olivat kokeneet sulatusjuotoksen kuusi kertaa, paistettiin 24 tuntia 110 °C lämpötilassa. Paistamisen jälkeen molempien näytteiden lasitransformaatiolämpötilat olivat nousseet, mutta ne eivät palanneet kontrollinäytteiden tasolle. Paistoaltistus ei siis riittänyt näytteiden lasitransformaatiolämpötilojen palauttamiseen kuutta sulatusjuotuskertaa edeltäneelle alkuarvolle. Tästä voidaan päätellä, että sulatusjuotosproesseissa näytteisiin mahdollisesti jäänyt kosteus ei ollut ainoa lasitransformaatiolämpötilaa laskeva tekijä, sillä kaiken ylimääräisen laminaatteihin jääneen kosteuden voidaan olettaa haihtuneen niille tehdyn paiston aikana.

Toisessa tutkimuksessa [31] keskityttiin vain korkean ja keskitason T_g :n FR-4-laminaattien tutkimiseen, mutta toisin kuin edellä, näytteitä altistettiin sekä muuttuville sulatusjuotostoistomäärille että muuttuvaparametriselle sulatusjuotokselle. Referenssisulatusjuotosprofiilin maksimilämpötila oli 255 °C, aika juotteen sulamispisteen yläpuolella (time above liquidus, TAL) oli 90 sekuntia, ja sulatusjuotosprosessien määrä oli kaksi, kuten tyypillisessä kaksipuoleisen piirilevyn kalustuksessa. Sulatusjuotosprosessien määrien vaikutusta näytteiden lasitransformaatiolämpötiloihin tutkittaessa havaittiin, että keskitason T_g :n laminaatin lasitransformaatiolämpötila laski kahden ja kuuden sulatusjuotosprosessin jälkeen prosessoimattomaan näytteeseen verrattuna, mutta toisin kuin edellä, suurempi määrä sulatusjuotoksia johti pienempään lasitransformaatiolämpötilan muutokseen. Korkean T_g :n laminaatin lasitransformaatiolämpötila muuttui kuten edellä: suurempi sulatusjuotosprosessien määrä johti suurempaan lasitransformaatiolämpötilan laskuun verrattuna prosessoimattomaan näytteeseen.

Molempien laminaattityyppien lasitransformaatiolämpötilan käyttäytymistä tutkittiin [31] myös tapauksissa, joissa sulatusjuotosprosessin aikaa juotteen sulamispisteen yläpuolella vaihdeltiin. Maksimilämpötilan pysyessä samana kuin referenssiprofiilissa, muuttuvina TAL-arvoina käytettiin 30, 90 ja 150 sekuntia. Sekä keskitason että korkean T_g :n laminaattien lasitransformaatiolämpötilat muuttuivat merkittävästi kaikilla TAL-arvoilla verrattuna prosessoimattomiin näytteisiin. Keskitason T_g :n näytteen lasitransformaatiolämpötila muuttui sitä matalammaksi, mitä pidempää TAL-arvoa sulatusjuotosprosessissa käytettiin. Myös eri TAL-arvojen väliset muutokset lasitransformaatiolämpötilassa olivat merkittäviä keskitason T_g :n näytteille. Korkean T_g :n laminaatin lasitransformaatiolämpötila laski sitä enemmän, mitä pidempää TAL-arvoa käytettiin 30 s ja 90 s tapauksissa, mutta TAL-arvon ollessa 150 s T_g :n lasku oli maltillisempaa. TAL-arvolla 150 s prosessoitujen näytteiden lasitransformaatiolämpötila jäi korkeammaksi kuin 90 s TAL-arvolla prosessoitujen näytteiden. TAL-arvojen 90 s ja 150 s välinen lasitransformaatiolämpötilojen muutos ei ollut merkittävä, mutta TAL-arvoon 30 s verrattuna molemmat muutokset olivat merkittäviä. Korkeamman T_g :n laminaattien lasitransformaatiolämpötilaan TAL-arvon kasvatus vaikutti siis vähemmän, kuin keskitason T_g :n laminaatteihin.

Viimeiseksi tutkittiin [31] tapauksia, jossa sulatusjuotosprosessin maksimilämpötilaa muutettiin TAL-arvon pysyessä samana kuin referenssiprofiilissa. Käytetyt maksimilämpötilan arvot olivat 225 °C, 255 °C ja 290 °C. Sekä keskitason että korkean T_g :n laminaattien lasitransformaatiolämpötilat laskivat sitä enemmän, mitä korkeampaa maksimilämpötilaa käytettiin. Vastaavasti kuin muuttuvan TAL-arvon tapauksessa, kaikki keskitason T_g :n näytteissä havaitut muutokset olivat merkittäviä sekä prosessoimattomaan näytteeseen että toisiinsa verrattuna. Korkean T_g :n näytteissä tapahtuneet lasitransformaatiolämpötilan muutokset olivat kaikilla maksimilämpötilan arvoilla merkittäviä prosessoimattomaan näytteeseen verrattuna, mutta muutos lasitransformaatiolämpötilassa 255 °C ja 290 °C maksimilämpötilojen välillä ei ollut enää merkittävä. Kuiten-

kin näillä maksimilämpötilan arvoilla lasitransformaatiolämpötilan muutos oli merkittävä 225 °C maksimilämpötilan aikaansaamaan lasitransformaatiolämpötilaan verrattuna. Tuloksista havaitaan, että myös sulatusjuotosprosessin maksimilämpötilan kasvattaminen vaikutti keskitason T_g :n laminaatteihin enemmän, kuin korkean T_g :n laminaatteihin.

Keraamia sisältävien materiaalien lasitransformaatiolämpötilan käyttäytyminen voi olla hyvin erilaista edellä esitettyyn verrattuna. Eräässä tutkimuksessa [32] valmistettiin epoksihartsia ja BaTiO₃-keraamia sisältävää filmimateriaalia, ja tutkittiin sen lasitransformaatiolämpötilan muuttumista eri lämpötiloissa suoritettujen kovetuksien (cure) seurauksena. Keraamia oli kyseisessä filmimateriaalissa 50 painoprosenttia, muu osa koostui epoksihartsista, dispersioaineesta, liuottimesta ja kovetusaineesta (curing agent). Kolme näytettä valmistettiin siten, että kovetusaineen määrä vaihteli muuten identtisissä seoksissa. Kolmanteen näytteeseen lisättiin myös kovetuksen kiihdyttäjääainetta (curing accelerator). Kaikkia kolmea näytettä kovetettiin tunnin ajan neljässä eri kovetuslämpötilassa, jotka olivat 160 °C, 180 °C, 200 °C ja 220 °C. Lasitransformaatiolämpötilan referenssinä käytettiin 160 °C lämpötilassa kovettettujen näytteiden arvoja. Vähiten kovetusainetta sisältäneen näytteen lasitransformaatiolämpötilaa ei kyetty määrittämään 160 °C kovetuksen jälkeen, sillä näytteen kovetuksen aste oli liian matala. Muilla kovetuslämpötiloilla havaittiin, että vähiten kovetusainetta sisältäneen näytteen lasitransformaatiolämpötila nousi sitä enemmän, mitä korkeammassa lämpötilassa näytettä kovetettiin. Korkeamman kovetusainepitoisuuden näytteen lasitransformaatiolämpötila nousi merkittävästi 180 °C lämpötilassa tehdyn kovetuksen jälkeen verrattuna referenssiin, mutta tämän jälkeen kovetuslämpötilan nosto ei enää vaikuttanut lasitransformaatiolämpötilaan. Kovetusainetta ja kovetuksen kiihdyttäjääainetta sisältäneen näytteen lasitransformaatiolämpötila oli myös hieman alempi 160 °C kovetuslämpötilan jälkeen verrattuna korkeampien lämpötilojen aikaansaamiin lasitransformaatiolämpötiloihin. Korkeammilla kovetuslämpötiloilla tämän näytteen lasitransformaatiolämpötila pysyi muuttumattomana kovetuslämpötilan arvosta riippumatta.

Tutkimuksessa [32] pääteltiin, että lasitransformaatiolämpötilan muutos oli riippuvainen näytteiden kovetuksen asteesta. Vähiten kovetusainetta sisältänyt näyte ei ollut vielä täysin kovettunut 160 °C tai 180 °C lämpötilassa tehdyn kovetuksen jälkeen, minkä seurauksena näytteen lasitransformaatiolämpötilan muutos näiden lämpötilojen vaikutuksesta oli suurin. 200 °C ja 220 °C kovetuslämpötilat ehtivät juuri ja juuri kovettaa vähiten kovetusainetta sisältäneen näytteen täysin, minkä vuoksi lasitransformaatiolämpötila kasvoi edelleen, mutta ei niin rajusti kuin alemmilla lämpötiloilla kovetettaessa. Kahdelle muulle näytteelle kaikki muut paitsi 160 °C kovetuslämpötila riittivät näytteiden täydelliseen kovettamiseen, mistä johtuen näiden näytteiden lasitransformaatiolämpötilassa ei juuri havaittu muutosta kovetuslämpötilan muuttuessa.

Tarkastelun perusteella voidaan sanoa, että materiaalin lasitransformaatiolämpötila on riippuvainen olosuhteista, joille materiaali altistuu. Sopivaa piirilevymateriaalia valittaessa on otettava huomioon, minkälaisille prosessi- ja käyttölämpötiloille piirilevy mahdollisesti elämänsä aikana altistuu. FR-4-laminaattien tapauksessa korkeamman T_g :n

laminaattien todettiin pitävän lasitransformaatiolämpötilansa paremmin vakioina, kuin matalan tai keskitason T_g :n laminaattien. Korkean ja keskitason T_g :n laminaattien lasitransformaatiolämpötilan havaittiin laskevan korkeiden prosessilämpötilojen seurauksena, kun taas matalan T_g :n laminaattien lasitransformaatiolämpötila saattoi jopa kasvaa. Keraamia sisältävän materiaalin lasitransformaatiolämpötilan muutoksen havaittiin puolestaan olevan riippuvainen materiaalin kovetuksen asteesta. Mitä täydellisemmin materiaali oli kovettunut, sitä vähemmän lasitransformaatiolämpötilan havaittiin muuttuvan. Lasitransformaatiolämpötilaa käytetään usein piirilevyn turvallisen maksimikäyttölämpötilan määrittämiseen, sillä lasitransformaatiolämpötilan ylitys piirilevyä käytettäessä voi johtaa paljaan piirilevyn rakenteen heikkenemiseen tai jopa koko piirilevyn vaurioitumiseen. Tämän vuoksi on tärkeää valita korkean lämpötilan käyttösovellukseen sellainen piirilevymateriaali, jonka lasitransformaatiolämpötilan kehitys korkeissa lämpötiloissa on mahdollisimman suotuisaa.

3.2 Juote

Seuraavaksi tarkastellaan erilaisten juotteiden ominaisuuksia. Juote on tärkeä osa mitä tahansa piirilevykokoonpanoa, sillä sen avulla kiinnitetään useimmat komponentit paljaaseen piirilevyyn. Juotteen sulamislämpötilan tulee olla juoteliioksen kokema lämpötilaa korkeampi, jotta liitos kestäisi käyttöä vikaantumatta. Korkean lämpötilan sovelluksissa juotteen sulamislämpötilan tulee luonnollisesti olla tavanomaista korkeampi. Piirilevyn ja komponenttien välisiin liitoksiin on perinteisesti käytetty eri seossuhteisia tina-lyijy-juotteita (SnPb). Eri seossuhteilla juotteen sulamislämpötilaa on ollut mahdollista säätää, tehden siitä sopivan eri sovelluskohteiden lämpötilavaatimuksiin. Esimerkiksi eutektinen SnPb-juote (63 % Sn, 37 % Pb [15]) oli yleisimmin käytetty seossuhde normaalin lämpötila-alueen sovelluksiin 183 °C sulamispisteellään. Korkeamman lämpötila-alueen sovelluksiin tarkoitetuissa juotteissa lyijyn pitoisuutta kasvatetaan huomattavasti, noin 90–95 %:iin. RoHS-direktiivin tultua voimaan vuonna 2006 lyijypitoisten juotteiden käyttö on ollut rajoitettua, ja pyrkimyksenä on lopettaa lyijyn käyttö juotteissa kokonaan. Normaalille lämpötila-alueelle on kehitelty toimivia korvaavia ratkaisuja. Yleisin niistä on tinaa, hopeaa ja kuparia sisältävä SAC-juote. Kuitenkin korkeamman lämpötilan lyijyttömien juotteiden kehitys on osoittautunut haastavaksi, eikä yksittäistä hyvää vaihtoehtoa vielä ole.

Useita vaihtoehtoja [33] [34] [35] [36] lyijyllisten korkean lämpötilan juotteiden korvaamiseksi on tutkittu, mutta lähes aina lyijyllinen vaihtoehto on osoittautunut ominaisuuksiltaan parhaimmaksi. Yleisimpiä tutkittuja seosvaihtoehtoja tina-lyijy-juoteseokselle ovat olleet

- tina-alumiini-pohjainen (ZnAl),
- vismuttipohjainen (Bi),
- kupari-tina-pohjainen (CuSn),
- kulta-tina-pohjainen (AuSn) ja

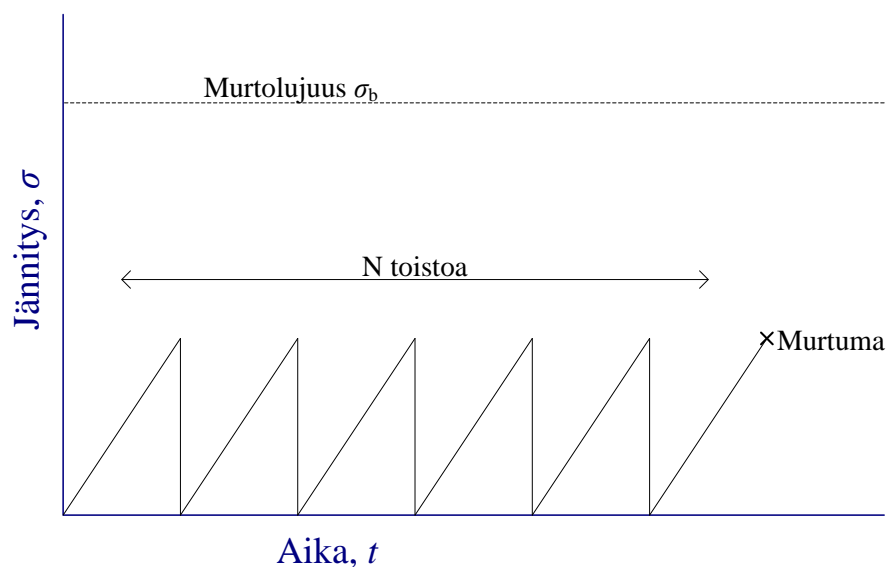
- kulta-germanium-pohjainen (AuGe) seos.

Lueteltuja metalliseoksia on testattu vaihtelevasti eri seossuhteilla, mutta yksikään niistä ei ole ominaisuuksiltaan voittanut perinteistä korkean lämpötilan SnPb-juotetta. Seuraavaksi tarkastellaan kahta juotteelle tärkeää mekanismia, väsymistä ja virumista, joiden avulla erilaisten juotteiden käyttäytymistä voidaan tarkastella.

3.2.1 Väsyminen

Materiaalin väsymistä [8] [19] [37] tapahtuu, kun sen tietty osa altistuu toistuvasti jännityksen aiheuttamalle rasitukselle. Vaikka materiaaliin kohdistuvat jännitykset pysyisivät sen murtolujuuden alapuolella, voi murtuma silti tapahtua väsymisen ansiosta. Rasitus voi olla joko mekaanista tai termistä, mutta sen on oltava toistuvaa, jotta väsymismurtuma voi ilmetä.

Kuvassa 15 on havainnollistettu väsymismurtuman syntymekanismia. Kun materiaali on toistuvassa rasituksessa, siihen kohdistuu toistuva jännitys. Yksittäiset jännityspiikit ovat selvästi materiaalin murtolujuutta pienempiä, mutta rasituksen jatkuessa materiaali murtuu tästä huolimatta. Murtuma johtuu materiaalissa olevista tai sinne ydintyvistä säröistä. Toistuva jännitys merkitsee vuorottelevia veto- ja puristusvaiheita. Vetovaihe kasvattaa säröä, mutta puristusvaihe ei ole riittävä sen sulkemiseen, sillä särön pinta on ehtinyt oksidoitua. Täten toistuva jännitys kasvattaa säröä vähitellen, kunnes särö saavuttaa kriittisen koon ja syntyy murtuma.

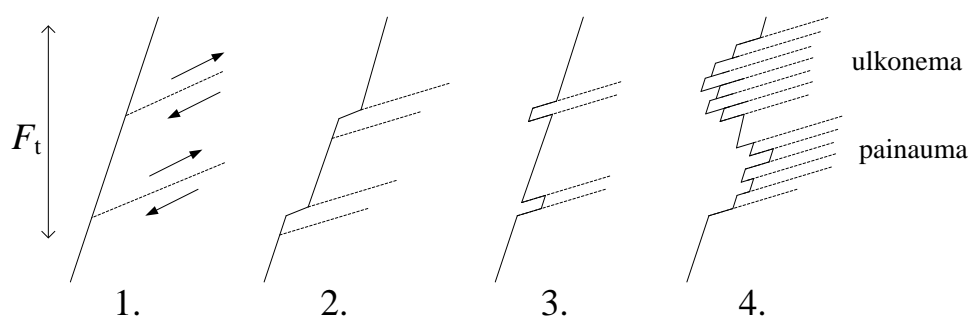


Kuva 15: Väsymismurtuman muodostuminen toistuvan jännityksen seurauksena. Muokattu lähteestä [19].

Väsymismurtuman mahdollistavan alkuperäisen särön synty [38] voidaan selittää materiaalin mikrorakenteen avulla. Tarkastellaan särön syntyä metalliseoksen näkökulmasta. Metalliseokset ovat monikiteisiä aineita, jotka sisältävät aina enemmän tai vähemmän dislokaatioita sekä raerajoilla että kiteiden sisällä. Kiteen sisällä tapahtuva, kidetason

suuntainen dislokaatioiden liike aikaansaa kokonaisten liukutasojen muodostumisen. Liukutasojen liike kiteen sisällä aiheuttaa metalliseokseen peruuttamattomia leikkausmuodonmuutoksia. Pehmeät metalliseokset, joissa dislokaatioiden määrä on alhainen, saattavat lujittua syklisen rasituksen ansiosta. Syklisen rasituksen aikaansaamat peruuttamattomat muodonmuutokset lisäävät kiteissä esiintyvien dislokaatioiden määrää. Dislokaatioiden määrän kasvu johtaa dislokaatioiden liikkuvuuden rajoittumiseen, mikä rajoittaa liukutasojen muodostumista ja täten lujittaa kidettä. Toisaalta alkujaan lujissa tai lujitetuissa metalliseoksissa dislokaatiot uudelleenjärjestäytyvät syklisen rasituksen seurauksena siten, että dislokaatioiden liikkuvuuskyky kasvaa. Dislokaatioiden suurempi liikkuvuus aikaansaa myös liukutasojen muodostumisen kiteisiin, ja aiheuttaa täten metalliseoksen heikkenemisen.

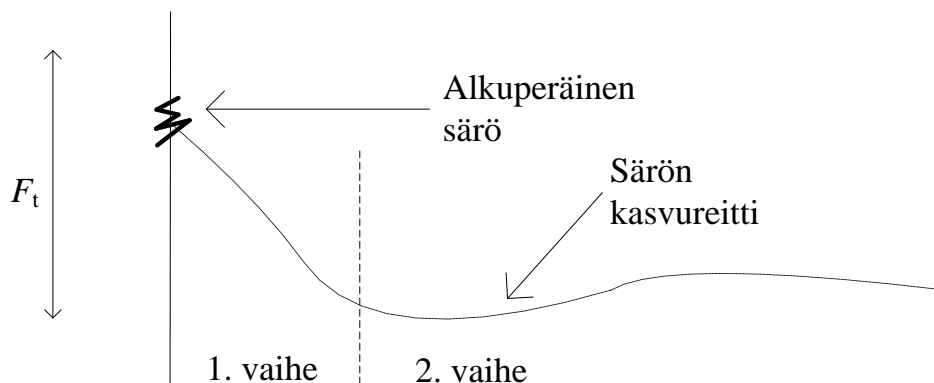
Syklisen rasituksen aikaansaama metalliseoksen lujittuminen tai heikkeneminen [38] riippuu siis kiteiden tilasta ennen rasitusta, ja voi olla joko hyvin globaalia tai lokaalia. Väsymismurtuman kannalta kiinnostavimpia ovat lokaalit heikkenevät kiteet seoksessa. Näissä kiteissä syntyvät liukutasot aiheuttavat lopulta säröjä, joista väsymismurtuma alkaa syntyä. Kuvassa 16 on havainnollistettu liukutasojen liikkeen aikaansaamia säröjä metalliseoksen pinnalla. Syklinen rasitus saa muodostuneet liukutasot liikkeelle, ja rasituksen jatkuessa tasot liikkuvat myös toisiinsa nähden. Yhden tason paksuus on luokkaa $0,1 \mu\text{m}$. Lopulta tasot ovat liikkuneet siten, että niistä on muodostunut ulkonemia ja painaumuksia. Erityisesti painaumien aikaansaavat jännityskeskittymiä kiteessä, mikä johtaa lopulta painaumien suurentumiseen ja särön muodostumiseen. Painaumuksia voi esiintyä myös seoksen sisällä, mutta useimmiten ne muodostuvat juuri metallin pintaan. Pinnan tasoittaminen onkin yksi tehokas keino estää väsymismurtumien muodostumista. Väsymismurtuman aiheuttava särö voi ydintyä myös muualle kuin liukutasojen painaumiin. Syklisen rasituksen seurauksena särö voi muodostua metalliseoksen pinnalla tai pinnan lähellä sijaitseviin epäjatkuvuuskohtiin. Epäjatkuvuuskohdiksi luetaan liukutasojen lisäksi esimerkiksi myös sulkeumat, erkaumat, korroosion aiheuttamat raot, raerajat ja aukot (void).



Kuva 16: Särön muodostuminen liukutasojen liikkeen seurauksena. 1. Liukutasot muodostuvat. 2. Liukutasot alkavat liikkua. 3. Yksittäiset liukutasot alkavat erottua. 4. Liukutasojen liike muodostaa ulkonemia ja painaumuksia. Muokattu lähteestä [38].

Särön ydinyttyä se jatkaa kasvamistaan joko kiteen sisällä tai raerajoja pitkin. Särön kasvu voidaan jakaa kahteen vaiheeseen: ensimmäisenä esiintyvään leikkausvaiheeseen ja toisena esiintyvään vetovaiheeseen. Nämä vaiheet on esitetty kuvassa 17. Särö kasvaa

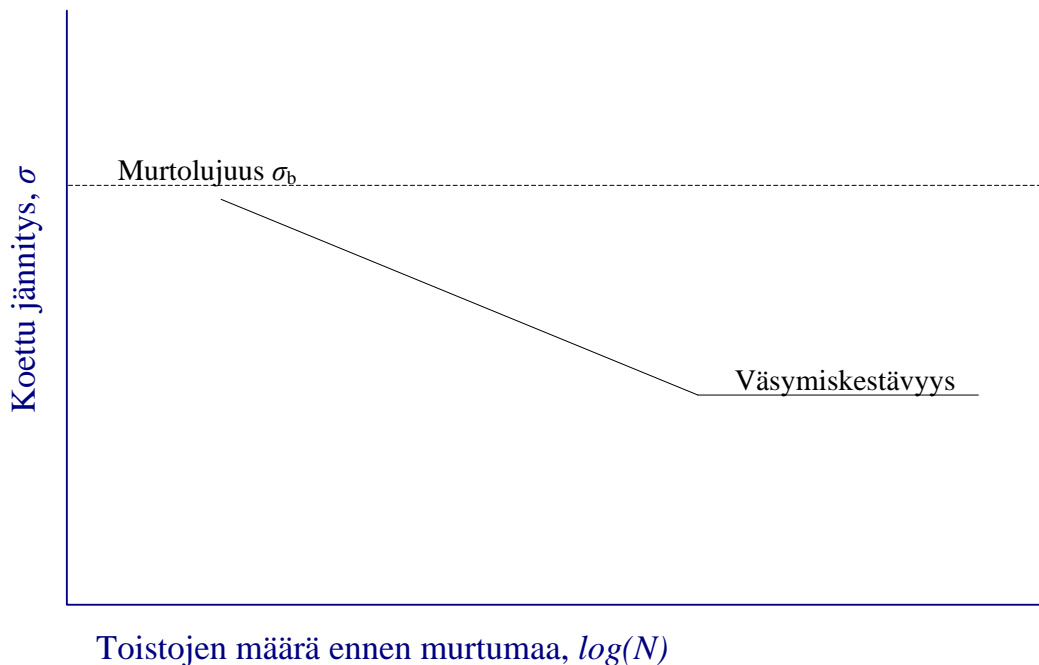
ensin noin 45° kulmassa syklisen jännityksen aiheuttamaa voimaa vastaan, jolloin jännitys on leikkaavaa. Leikkausvaiheen jälkeen särön kasvusuunta kääntyy poikkisuoraksi syklistä jännitystä vastaan, jolloin jännitys on vetojännitystä. Särö jatkaa kasvuaan, kunnes lopullinen murtuma tapahtuu. Lopullinen murtuma syntyy, kun syklinen rasitus yrittää jäljelle jääneen ehjän alueen murtolujuuden.



Kuva 17: Särön kasvamisen vaiheet. Muokattu lähteestä [38].

Väsyminen on erittäin yleinen juotteessa ilmenevä vikamoodi. Korkean lämpötilan juote altistuu esimerkiksi lämpösyklitesteissä suurille lämpötilanvaihteluille, ja kokee näin suuria termomekaanisia jännitteitä lämpölaajenemisen takia. Jos järjestelmää testataan lämpötilaa vaihdellen, juote kokee testin ajan toistuvaa rasitusta ja altistuu täten helposti väsymiselle. Lämpötilan vaihtelun seurauksena juotteeseen voi muodostua säröjä, jotka rasituksen toistuessa voivat suurentua, ja johtavat lopulta murtumaan ja sähköisen kontaktin rikkoontumiseen.

Tarvittavien toistojen määrää väsymismurtuman syntymiseen voidaan pitää yhtenä juotteen kestävyysmittana. Vaikka lopullista murtumaa ei pääsisi syntymään, jo osittainen särö voi vaikuttaa juoteliihtoksen toimintaan. Särö kasvattaa juotteen sähkö- ja lämpöresistanssia [39], ja täten vaikuttaa juotteen kestävyteen kasvattamalla sen lämpötilaa huomattavasti käyttölämpötilaa korkeammaksi. Huomionarvoista on myös se, että juotteen murtolujuus tyypillisesti laskee, kun lämpötila nousee. Korotetussa lämpötilassa juotteeseen kohdistuvat jännitystilat ovat suuruudeltaan lähempänä murtolujuutta, mikä nopeuttaa väsymismurtuman syntymistä. Kuvassa 18 on havainnollistettu väsymismurtuman syntymiseen tarvittavien toistojen määrää materiaaliin kohdistuvan jännityksen muuttuessa suhteessa murtolujuuteen. Väsymismurtuma syntyy jo pienellä määrällä toistoja, kun materiaaliin kohdistuva jännitys on lähellä materiaalin murtolujuutta. Kun koettu jännitys on huomattavasti murtolujuutta pienempi, tarvitaan suuri määrä toistoja murtuman syntymiseen. Koetun jännityksen alittaessa väsymiskestävyuden rajan ei murtumaa tyypillisesti tapahdu suurellakaan toistojen määrällä.



Kuva 18: Materiaalin kokeman jännityksen vaikutus väsymismurtuman synty nopeuteen. Muokattu lähteestä [19].

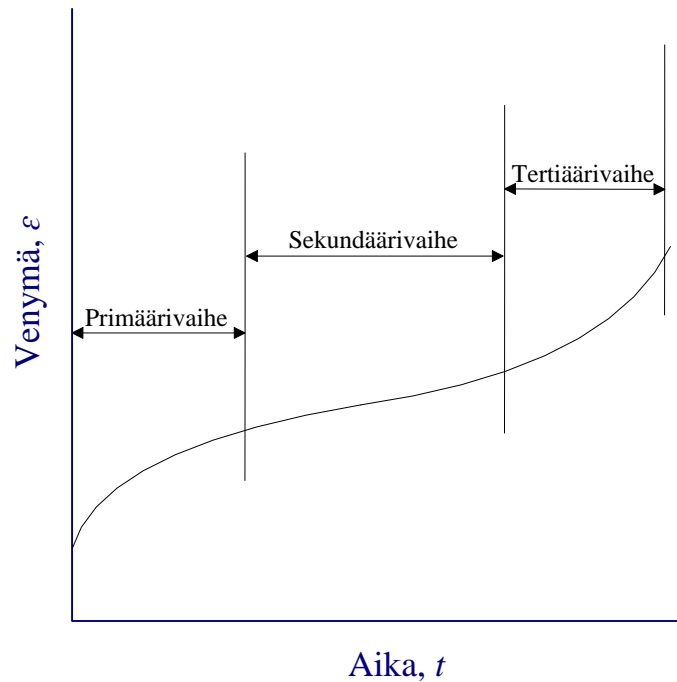
3.2.2 Viruminen

Viruminen [19] kuvaa materiaalin, esimerkiksi juotteen, venymäkäyttäytymistä ajan suhteen materiaaliin kohdistuvan jännityksen pysyessä vakiona. Pitkän ajan kuluessa viruminen voi aiheuttaa murtumia materiaaliin. Materiaalin virumiskäyttäytymistä voidaan ennustaa sen homologisen käyttölämpötilan avulla. Materiaalin homologinen käyttölämpötila T_h määritellään sen käyttö- ja sulamislämpötilan T_u ja T_{liq} välisenä suhteena

$$T_h = \frac{T_u}{T_{liq}} \cdot 100 \%. \quad (8)$$

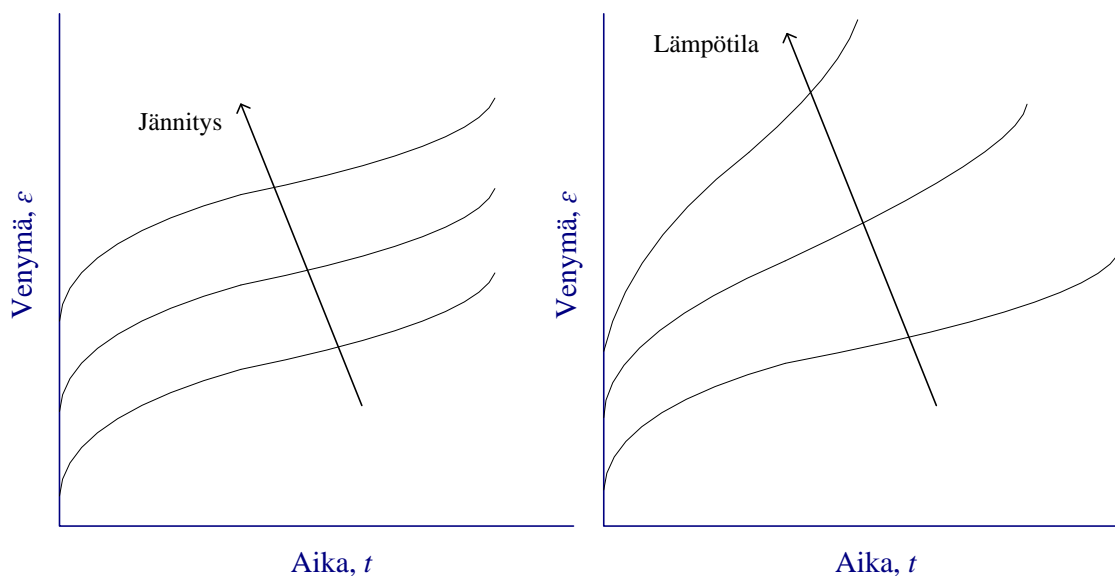
Kun materiaalin homologinen lämpötila on noin 40 – 60 %, sen sanotaan olevan altis virumiselle [39].

Jotta virumista tapahtuisi, materiaalin käyttölämpötilan pitää siis olla verrattain korkea suhteessa materiaalin sulamislämpötilaan, eikä matalissa lämpötiloissa virumista havaita pitkänkään ajan kuluttua. Kuvassa 19 on tyypillinen virumiskäyrä, joka näyttää venymän ε muutoksen ajan t funktiona. Kuvasta nähdään hyvin virumiselle tyypilliset kolme eri vaihetta. Primäärivaiheelle ominaista on virumisnopeuden hidastuminen ajan suhteen. Sekundaarivaiheessa viruminen saavuttaa vakionopeuden, ja tämä vaihe kestää tyypillisesti pisinpäin. Lopulta viruminen saavuttaa tertiäärivaiheen, jolloin virumisnopeus ajan suhteen kasvaa, kunnes materiaali murtuu.



Kuva 19: Tyypillinen virumiskäyrä. Muokattu lähteestä [19].

Kuvassa 20 on havainnollistettu jännityksen ja lämpötilan muutoksen vaikutusta virumiseen. Vakiojännityksen kasvattaminen vaikuttaa virumiskäyrään vain alkuvienymän määrää suurentaen, eikä käyrän muoto, eli materiaalin virumiskäyttäytyminen muutu merkittävästi. Lämpötilan muutos taas vaikuttaa ratkaisevasti lopullisen murtuman syntymisnopeuteen. Kuvasta nähdään, että lämpötilan kasvaessa sekundäärivaiheen vakiovirumisnopeus kasvaa voimakkaasti, johtaen sekundäärivaiheen lyhenemiseen ja nopeampaan lopullisen murtuman syntymiseen.



Kuva 20: Virumiskäyrän muutos kasvavalla jännityksellä ja lämpötilalla. Muokattu lähteestä [19].

Virumista pidetään yleisesti materiaalien luotettavuuden kannalta huonona asiana, mutta juotteen tapauksessa se on välttämätön systeemin toiminnan varmistamiseksi. Juotteen edellytetään viruvan, jotta se voisi kompensoida piirilevyn ja komponenttien lämpölaajenemiskertoimien erojen aiheuttamia jännityksiä. Kun levy ja komponentti laajenevat tai supistuvat lämpötilan muuttuessa, viruva juote auttaa liitosta absorboimaan lämpölaajenemisen aiheuttaman mekaanisen jännityksen. Virumisnopeus ei kuitenkaan saa olla liian suuri, etteivät komponentit ala liikkua levyllä ajan kuluessa. Viruminen auttaa myös torjumaan väsymisen aiheuttamia murtumia juotteessa. Jos juotteeseen muodostuu särö toistuvan rasituksen seurauksena, viruminen mahdollistaa juotteen uudelleen muokkautumisen ja särön kasvun pysäyttämisen.

Eräässä lämpösyklitestissä [35] havaittiin, että juote, jolla oli suurin virumisnopeus, kesti lämpötilan vaihtelua parhaiten, kun testin sykli tahti oli tarpeeksi hidas. Nopeampitahtisessa syklistestissä virumista ei ehdi tapahtua, sillä viruminen tapahtuu pitkällä aikavälillä. Kolme lyijytöntä juotetta (Sn-0.7Cu, Sn-3.5Ag ja Sn-3.8Ag-0.7Cu) verrattiin eutektiseen SnPb-juotteeseen, ja ainoastaan SnCu-juote kesti lämpötilan vaihtelun ilman täydellistä murtumaa. SnCu oli testin juotteista heikoin, myötäävin, ja sillä oli nopein vakiovirumisnopeus. Tämän ansiosta se pystyi deformatumaan testin aikana tehokkaimmin, eikä lopullista murtumaa päässyt syntymään. Voidaan siis päätellä, että riittävän hidastahtisessa lämpösyklitestissä herkästi viruva juote on kestävin.

Korkean lämpötilan SnPb-juote on erittäin pehmeä seos, ja se onkin helposti altis virumiselle ja sen aiheuttamille termomekaanisille vaurioille. SnPb-juotteen mikrokovuus on jopa alle kymmenesosan muutamiin lyijyttömiin korkean lämpötilan juotteisiin verrattuna. [34] Edellä esitellyn kokeen perusteella virumiselle eniten altis juoteseos oli kuitenkin lämpösyklitestissä kestävin vaihtoehto, eli virumisen kannalta korkealyijypitoinen SnPb on vaihtoehtoisista korkean lämpötilan juotteista luotettavin, kun ollaan lähellä Sn-0.7Cu-juotteen sulamislämpötilaa.

Taulukkoon 2 on koottu tässä alaluvussa esiteltyjen juoteseoksien tärkeimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 2: Eri juoteseoksien ominaisuuksia. Lukuarvot [35] [40].

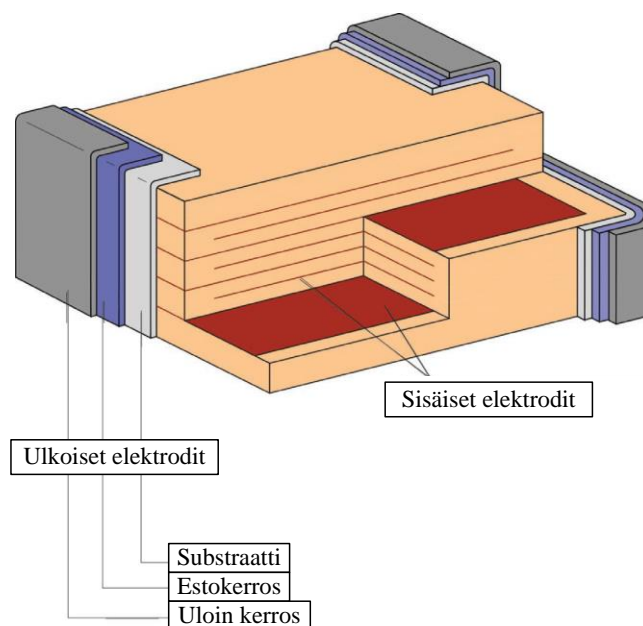
Juoteseos	T_{liq} [°C]	T_h [%] kun $T_u = 25$ °C	T_h [%] kun $T_u = 200$ °C
Sn-88Pb-02Ag	299	8,3	67
Sn-37Pb	183	14	109
Sn-0.7Cu	225	11	89

Koska sopivaa lyijytöntä metalliseosta korkean lämpötilan sovelluksiin ei ole vielä kehitetty, on tutkimuksissa myös pohdittu juottamiselle vaihtoehtoisia tapoja liittää komponentteja piirilevylle. Esiin on noussut esimerkiksi johtavien liimojen (electrically conductive adhesive, ECA), transientin nestevälitteisen liitoksen (transient liquid phase bonding) tai metallisitrauksen käyttö. Näistä johtavat liimat perustuvat polymeeripohjaisen sidosaineen ja johtavan täyteaineen, esimerkiksi kullan tai kuparin, yhdistelmään.

Transientissa nestevälitteisessä liitoksessa käytetään liitettävien metallien välillä matalan sulamislämpötilan ohutta metallikerrosta, joka sulaa ja diffusoituu liitettäviin metalleihin, muodostaen korkeamman sulamispisteen metallienvälisiä yhdisteitä. Metallisintaus on myös diffuusion perustuva liitostekniikka. Siinä esimerkiksi hopearakeista koostuvaa pastaa lämmitetään korkean paineen alla liitoksen muodostamiseksi. Nämä vaihtoehtoiset tavat tuovat kuitenkin mukanaan uudenlaisia ongelmia, eivätkä nekään suoraan pysty ratkaisemaan korkean lämpötilan juotosongelmaa.

3.3 Kondensaattorit

Yksi yleisimmin käytössä olevista kondensaattorityypeistä on pintaliitettävä monikerroksinen kondensaattori (multilayer ceramic chip capacitor, MLCC) [41], jossa elektrodien eristeenä on käytetty keraamia. Tässä aluvuossa keskitytään MLCC-kondensaattorin tarkasteluun, joten jatkossa kondensaattorilla viitataan monikerroksiseen keraamiseen kondensaattoriin. Kondensaattorin sisäinen rakenne on esitetty kuvassa 21. Monikerroksinen kondensaattori rakentuu limittäin toistensa päälle asetetuista sisäisistä elektrodeista, niiden välissä eristävänä dielektrisenä materiaalina käytetystä keraamista, sekä kondensaattorikotelon päädyissä olevista ulkoisista elektrodeista. Sisäisiin elektrodeihin käytetään esimerkiksi hopeaa, palladiumia ja nikkeliä. Ulkoiset elektrodit koostuvat kolmesta kerroksesta. Substraatti, joka kiinnittyy suoraan sisäisiin elektrodeihin, on tehty esimerkiksi hopeasta ja kuparista. Estokerroksen tehtävä on suojata kondensaattoria korkeilta lämpötiloilta juottamisen aikana. Estokerros valmistetaan lisäämällä nikkeliä kuparin päälle. Lopulta nikkeli peitetään vielä uloimmalla tinakerroksella, jonka tehtävä on parantaa kondensaattorin juotettavuutta.



Kuva 21: Keraamisen monikerroksisen kondensaattorin sisäinen rakenne. Sisäiset elektrodit on merkitty punaisella, oranssi alue on keraamia ja ulkoiset elektrodit ovat siniharmaita. Muokattu lähteestä [41].

Sisäiset elektrodilevyt sijaitsevat hyvin lähellä toisiaan, minkä vuoksi käytetyn eristemateriaalin on oltava kestävä, ettei ei-toivottuja elektrodien välisiä oikosulkuja pääsisi syntymään. Tutkimuksissa [42] [43] korkean lämpötilan on havaittu aiheuttavan kondensaattoreiden vikaantumisia kahdella tyypillisellä tavalla. Kondensaattoreita altistettiin [42] eripituisille korkean lämpötilan ja korkean syötetyn jännitteen vanhennustesteille. Vanhennuksen aikana kondensaattoreissa havaittiin oikosulkuja, jotka olivat aiheutuneet eristeen läpilyönneistä (punch-through). Eristeen läpilyönti tapahtuu, kun kondensaattorille jatkuvana syötetty jännite aiheuttaa vuotovirtaa. Pienet virheet eristeessä, kuten aukot tai poikkeuksellisen ohuet kohdat, saavat vuotovirran kerääntymään näihin paikkoihin. Virran kerääntyminen kiihtyy korotetun lämpötilan ansiosta, ja lopulta elektrodien välinen jännite pääsee purkautumaan kerääntyneen virran ansiosta. Tätä kondensaattorin tuhoavaa ilmiötä kutsutaan eristeen läpilyönniksi. Korkeassa lämpötilassa käytetyiltä kondensaattoreilta vaaditaan erinomaista valmistusprosessia vuotovirtaa keräävien virheiden välttämiseksi.

Toinen korkeassa lämpötilassa havaittu kondensaattorien vikaantumismekanismi on elektromigraatio. Elektromigraation aiheuttaa virran eli elektronien liike, joka saa elektrodien metalli-ionit liikkumaan elektronien mukana. Liikkuvat metalli-ionit voivat lopulta muodostaa elektrodien välille johtavan reitin, jota pitkin elektrodien oikosulku tapahtuu. Elektromigraatiota on havaittu tapahtuvan sekä sisäisten [42] että ulkoisten [43] elektrodien välillä. Elektromigraatioiden aiheuttamat oikosulut on liitetty tilanteisiin, joissa kondensaattorit on altistettu korkean lämpötilan lisäksi korkealle suhteelliselle ilmankosteudelle. Lämpötilaa nostettaessa ympäröivän ilman lämpötila nousee kondensaattorikoteloa nopeammin, jolloin kondensaattorikotelon lämpötila voi jäädä ympäröivän ilman kastepisteen alapuolelle. Tämä johtaa kosteuden tiivistymiseen kondensaattorikotelon pinnalle. Kosteus edistää elektromigraation syntyä sekä kondensaattorikotelon pinnalla että kotelon sisällä. Korotetussa lämpötilassa ilmenevää elektromigraatiota voidaan torjua hidastamalla lämpötilan nostoa siten, että kondensaattorikotelon lämpötila pysyy riittävän lähellä ympäröivän ilman lämpötilaa, jolloin kosteutta ei pääse tiivistymään kondensaattorikoteloon. Lämpötilan noston kontrolloinnin lisäksi elektromigraatiota voidaan torjua estämällä ionien liike esimerkiksi raerajoja vähentämällä.

3.4 Liittimet ja testikannat

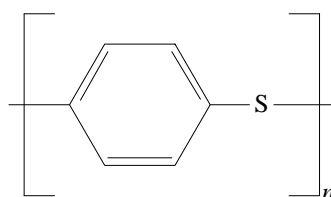
Tässä aluvuossa käsitellään testipiirilevyissä käytettyjen liittimien ja testikantojen muutamia eriste- ja johdemateriaaleja. Käsitellyt materiaalit on rajattu usein korkean lämpötilan yhteydessä käytettyihin yhdisteisiin ja seoksiin. Tarkastelu aloitetaan eristävästä polymeereistä, joista jatketaan johtavien metalliseoksien esittelyyn.

3.3.1 Polymeerit

Muoveja käytetään eristävänä rakennemateriaalina esimerkiksi liittimissä, kannoissa ja piirien koteloinnissa. Korkean lämpötilan sovelluksissa käytetään tyypillisesti erilaisia

lämpöplastisia kestopuoveja eli polymeerejä [44]. Kaikki polymeerit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: amorfisiin ja (osittain) kiteisiin polymeereihin. Kiteiset polymeerit säilyttävät toimintakykynsä myös lasitransformaatiolämpötilansa yläpuolella, minkä ansiosta niitä voidaan käyttää onnistuneesti erittäin korkeissa käyttölämpötiloissa. Korkean lämpötilan stabiilius johtuu muun muassa kiteisten polymeerien korkeista sulamislämpötiloista, ketjujen hyvästä kyvystä vastustaa niiden rappeutumista sekä alhaisesta reaktiivisuudesta erityisesti hapen kanssa. Näistä ominaisuuksista ketjujen rappeutumisen vastustuskyky on ehdottomasti tärkein. Bentseenirenkaista koostuva ketju vastustaa rappeutumista huomattavasti suoraketjuista polymeeriä paremmin. Ketju ei kuitenkaan saa koostua pelkästään bentseenirenkaista, ettei polymeeristä tulisi liian jäykkä prosessoitavaksi. Ihanteellinen korkean lämpötilan polymeeriketju sisältääkin siis bentseenirenkaita, sekä niiden välisiä sidosatomia tai -molekyylejä. Polyfenyleenisulfidia (PPS, Poly-Phenylene Sulfide) ja polyeetterieetteriketonia (PEEK, Polyetherether Ketone) tavataan useimmiten korkeaan lämpötilaan tarkoitetuissa komponenteissa, sillä ne täyttävät edellä mainitut kriteerit rakenteensa puolesta.

Polyfenyleenisulfidin [44] molekyylirakenne on esitetty kuvassa 22. Polymeeri rakentuu bentseenirenkaan ja rikkisillan muodostamasta toistuvasta osasta. Koska PPS on vain osittain kiteinen materiaali, siitä tehdyt ruiskuvalut sisältävät sekä kiteistä että amorfista polymeeriä. Kiteytymisen aste riippuu prosessista, mutta maksimaalista kiteytymisen astetta on vaikea saavuttaa. Valun jälkeen rakennetta voidaan kuitenkin kovettaa korotetussa lämpötilassa kiteytymisen loppuun saattamiseksi. Rakenteen korkean käyttölämpötilan luotettavuuden kannalta korkeampi kiteytymisen aste on parempi.

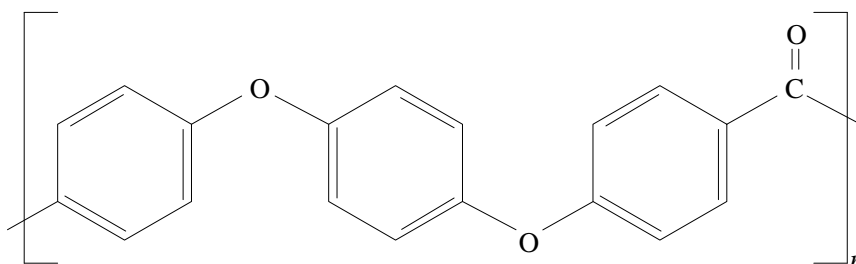


Kuva 22: Polyfenyleenisulfidin molekyyliketjun toistuva osa. Muokattu lähteestä [44].

Jos polyfenyleenisulfidia ei ole vahvistettu millään täyteaineella, siitä tehdyt valut voivat olla iskunkestoltaan huonoja sekä pehmeitä osittain jo 90 °C lasitransformaatiolämpötilassa. Valurakennetta voidaan kuitenkin vahvistaa erilaisilla täyteaineilla, esimerkiksi lasikuiduilla tai mineraaleilla, jolloin PPS-valun iskunkestoa saadaan parannettua. Täyteaineet myös rajoittavat valun lämpölaajenemiskerrointa sekä mahdollistavat rakenteen käytön korkeissa lämpötiloissa. Täyteaineista riippuen PPS-valua voidaan käyttää maksimissaan 200–240 °C lämpötilassa. Maksimikäyttölämpötila määritellään lämpötilana, jossa 50 % polymeerin alkuperäisistä mekaanisista ominaisuuksista on menetetty 25 000 tunnin käytön jälkeen.

Polyeetterieetteriketonia [44] [45] molekyylirakenne on esitetty kuvassa 23. Polymeeri rakentuu kolmen bentseenirenkaan, kahden happi- ja yhden ketoryhmän muodostamasta toistuvasta osasta. Myös PEEK on osittain kiteinen materiaali, eli siitä tehdyt valut si-

sältävät sekä kiteisiä että amorfisia alueita. PEEK kuitenkin saavuttaa hyvän kiteytymisen asteen nopeasti normaaleissa prosessiolosuhteissa, eikä sitä tarvitse kovettaa jälkilämmöllä kuten PPS:a.



Kuva 23: Polyetherieetteriketonein molekyyliketjun toistuva osa. Muokattu lähteestä [45].

Polyetherieetteriketonein ominaisuuksia voidaan myös parantaa seostamalla siihen eri aineita. Puhtaan PEEK:n lasitransformaatiolämpötila on noin 143 °C, mutta se säilyttää mekaaniset ominaisuutensa noin 250 °C käyttölämpötilaan asti. Polymeerin lasitransformaatiolämpötilaa voidaan kuitenkin kasvattaa seostamalla siihen esimerkiksi toista polymeeriä, polyeetteri-imidiä. Lasi- tai hiilikuitutäyttöä käytetään puolestaan valetun polymeerin vahvistamiseen.

Taulukkoon 3 on koottu tässä aluvussa käsiteltyjen polymeerien tärkeimmät ominaisuudet.

Taulukko 3: Eri polymeerien ominaisuuksia.

Polymeeri	T_g [°C]	Maksimikäyttölämpötila [°C]
PPS	90	200–240
PEEK	143	250

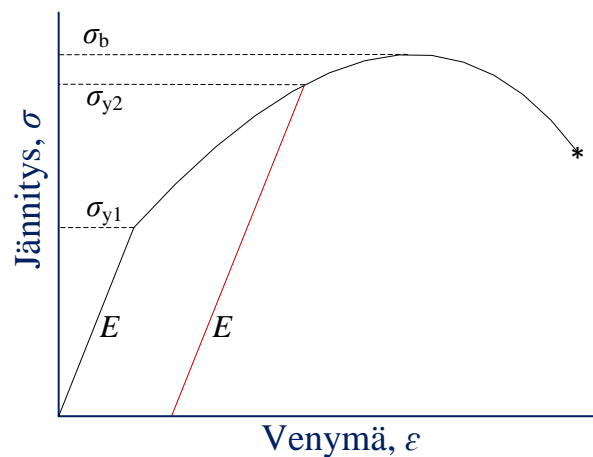
3.3.2 Metalliseokset

Metalleja sekä niiden seoksia tarvitaan komponenteissa sähköisten kontaktien aikaansaamiseksi. Liittimien ja kantojen tapauksessa hyvän johtavuuden lisäksi on tärkeää, että valittu johdemateriaali kestää useamman kontaktoitumisen, sekä säilyttää tarvittavat mekaaniset ominaisuutensa käyttöympäristöstä riippumatta. Kannoissa kontaktimateriaalit toimivat myös jousina, jotka pitävät kantoihin kiinnitetyt komponentit paikoillaan. Korkeassa lämpötilassa johteen on oltava materiaaliominauksiltaan erityisen kestävä.

Metalliseoksien lujuutta kasvatetaan tyypillisesti erkautuskarkaisulla (precipitation hardening). Erkautuskarkaisuprosessissa [19] huoneenlämpötilassa kaksifaasisena esiintyvä metalliseos kuumennetaan ensin yksifaasiselle alueelle ja jäähdytetään sitten nopeasti takaisin huoneenlämpötilaan. Nopean jäähtymisen ansiosta supersaturoitunut seos säilyy metastabiilisti yksifaasisena, sillä toinen faasi ei ehdi erkautua. Kahden selkeästi erottuvan faasin sijaan seoksessa on korkeassa lämpötilassa esiintyvistä seosfaasista koostuvia rakeita sekä toisen, vain huoneenlämpötilassa esiintyvän faasin muodostamia

pieniä erkaumia. Erkaumat asettuvat supersaturoituneessa seoksessa hallitsevan faasin raerajoille. Jäähdytyksen jälkeen seosta ikäännytetään korotetussa lämpötilassa, jolloin erkaumat pääsevät liikkumaan myös rakeiden sisälle jakautuen tasaisesti koko seokseen. Erkaumat estävät tehokkaasti dislokaatioiden liikkeen seoksessa täten nostaen materiaalin lujuutta.

Jousikontakteissa käytettävän metallin tulisi olla riittävän luja useamman kontaktoitumisen kestämiseksi, sekä tarpeeksi venyvä haurasmurtumien välttämiseksi. Tarvittava lujuus saavutetaan erkautuskarkaisulla. Tavallisesti metalliseoksen lujuus kasvaa karkaisuprosessin aikana, mutta vastaavasti sen venyvyys laskee. Erkautuskarkaisun vaikutusta materiaalin myötölujuuteen ja venyvyyteen on havainnollistettu kuvassa 24. Beryllium-nikkeli [46] on suosittu jousikontaktimateriaali, sillä erkautuskarkaisuprosessin aikana sen materiaaliominaisuudet muuttuvat muihin metalliseoksiin verrattuna epätyypillisesti. Erkautuskarkaistun beryllium-nikkelin on havaittu sekä lujittuneen että sen venyvyyden parantuneen. Ilmiön syy löytyy beryllium-nikkelin mikrorakenteesta, ja se voidaan selittää vertaamalla beryllium-nikkelin käyttäytymistä toiseen yleiseen kontaktimateriaaliin, esimerkiksi beryllium-kupariin.



Kuva 24: Myötölujuuden kasvu erkautuskarkaisussa. Musta käyrä kuvaa materiaalin käyttäytymistä ennen erkautuskarkaisua, punainen sen jälkeen. σ_{y1} on materiaalin myötölujuus ennen erkautuskarkaisua, ja σ_{y2} on materiaalin myötölujuus erkautuskarkaisun jälkeen. Erkautuskarkaisu ei muuta kimmokerrointa E tai murtolujuutta σ_b .

Eräässä tutkimuksessa [46] beryllium-nikkeliä ja beryllium-kuparia erkautuskarkaistiin erilaisissa lämpötiloissa ja mitattiin niiden vetolujuutta ja sitkeyttä. Kun molempia näytteitä oli karkaistu 850 °F (n. 454 °C) lämpötilassa 1,5 tunnin ajan, havaittiin, että beryllium-nikkelin vetolujuus oli samaa luokkaa, mutta korkeampi kuin beryllium-kuparin. Kiinnostavinta oli, että beryllium-nikkelin venyvyys oli jopa kahdeksankertainen beryllium-kupariin verrattuna. Beryllium-nikkelin lujuus saavutti suurimman arvonsa 975 °F (n. 524 °C) lämpötilassa tehdyn karkaisun jälkeen. Venyvyys oli suurimmillaan 850 °F lämpötilassa suoritetun karkaisun jälkeen, jolloin myös lujuus oli lähellä 975 °F lämpötilassa saavutettua maksimiarvoa. Voidaankin sanoa, että beryllium-nikkelin osalta

erkautuskarkaisun aiheuttama venyvyyden lasku voidaan ehkäistä sopivalla karkaisulämpötilan valinnalla.

Erkautuskarkaisun aikana tapahtuva erkaumien liike on hyvin samanlainen sekä beryllium-nikkelille että beryllium-kuparille. Karkaisuprosessin aikaansaama lujuuden kasvu johtuu seokseen levittäytyvistä erkaumista, jotka estävät dislokaatioiden liikettä seoksessa. Luonnollisesti dislokaatioiden liikkeiden rajoitusta seuraa sitkeyden alentuminen. Karkaisua tyypillisesti edeltävän kylmämuokkauksen ansioista metalliseoksen rakenteisiin on jäänyt myös dislokaatioita. Seoksen lujuuden maksimoinnin kannalta sopivassa lämpötilassa ikäännyttäminen saa beryllium-nikkelin rakenteessa olevat dislokaatiot toipumaan, mutta beryllium-kuparin tapauksessa lujuuden maksimoiva lämpötila ei ole riittävä toipumisprosessin käynnistämiseksi [46]. Toipumisprosessin aikana kylmämuokkauksen jättämät dislokaatiot poistuvat, minkä ansioista toipumisprosessi kasvattaa materiaalin venyvyyttä. Beryllium-nikkelin toipumisen aikaan saama venyvyyden kasvu on riittävä dominoimaan karkaisuprosessin aiheuttamaa venyvyyden laskua, jolloin karkaisuprosessin kokonaisvaikutus on beryllium-nikkelillä venyvyyttä kasvattava. Koska toipumista ei tapahdu beryllium-kuparilla ollenkaan, jää erkautuskarkaisuprosessin aiheuttama venyvyyden lasku dominoivaksi ilmiöksi.

Beryllium-nikkelin poikkeavaa erkautuskarkaisukäyttäytymistä voidaan siis pitää erittäin hyödyllisenä ilmiönä, sillä näin saadaan aikaan sekä luja että venyvä kontaktimateriaali. Kun kontaktimateriaalilta vaaditaan pelkkää lujuutta, on olemassa eräs erkautuskarkaisua edullisempi lujittamisreaktio, joka esitellään seuraavaksi.

Spinodaalinen hajoaminen [47] [48] (spinodal decomposition) on metalliseoksessa tapahtuva reaktio, jossa homogeeninen kiinteä tai nestemäinen seos hajoaa uusiksi faaseiksi. Homogeenisen seoksen tulee olla supersaturoitu, jotta spontaani hajoaminen voi tapahtua. Hajoamisen seurauksena syntyneet faasit eroavat koostumukseltaan alkuperäisestä seoksesta, mutta aineen kiderakenne on sama sekä ennen että jälkeen hajoamisen. Spinodaalinen hajoaminen edellyttääkin seosaineilta likimain samaa atomikokoja. Spinodaalinen hajoaminen voi tapahtua vain, jos seoksen faasidiagrammissa esiintyy liukoisuusaukko, eli alue, jossa yksifaasinen seos muuttuu kaksifaasiseksi. Tämän lisäksi seosatomien tulee olla riittävän liikkuvia hajoamislämpötilassa.

Spinodaalinen hajoamisprosessi saadaan aikaan seosta sopivasti lämmittämällä. Aluksi seos homogenisoidaan korkeassa lämpötilassa seosaukon yläpuolella. Kun homogeeninen seos on saavutettu, lämpötila pudotetaan lähelle huoneenlämpötilaa, ja nostetaan hitaasti takaisin spinodaalisen alueen lähelle reaktion käynnistämiseksi. Reaktio tapahtuu hitaasti, joten seosta on pidettävä tässä lämpötilassa tarpeeksi kauan hajoamisen loppuunsaattamiseksi. Spinodaalisen hajoamisen seurauksena metalliseos on kovempi kuin alkuperäinen homogeeninen seos. Kolme erilaista teoriaa [47] on esitetty kovettumisen selittämiseksi, eikä yhtä oikeaa mallia ole vielä ratkaistu.

Vaikka kovettumisen malli ei ole yksiselitteinen, on kuitenkin selvää, että spinodaalinen rakenne tuo etuja tavalliseen erkautuskarkaistuun metalliseokseen nähden. Spinodaalisen metalliseoksen kiderakenne on koko aineessa yhtenäinen, kun taas karkaistulla seoksella kiderakenne vaihtelee faasien välillä. Tämä mahdollistaa esimerkiksi kiinteän kappaleen valmistamisen ennen spinodaalista reaktiota, sillä kiderakenteen säilyessä muuttumattomana kiinteä kappale ei muuta muotoaan spinodaalisen hajoamisen aikana. Toisin kuin tavallinen karkaisuprosessi, spinodaalinen reaktio ei myöskään tarvitse aktivaatioenergiaa reaktion käynnistämiseksi, vaan se tapahtuu aina spontaanisti ja täydellisesti. Karkaisuprosessin lopputulos taas riippuu suuresti aktivaatioenergian määrästä, sillä liian pieni aktivaatioenergia ei käynnistä prosessia lainkaan, tai voi jättää karkaisun asteen vajaaksi. Loppukäytössä spinodaaliset seokset eivät helposti vanhene tai uudelleen kiteydy yhtenäisen kiderakenteensa ansiosta, toisin kuin tavalliset karkaistut metalliseokset.

Spinodaalinen reaktio jää helposti toisarvoiseksi faasien erkanemisen tapahtuessa ensin seosta lämmitettäessä. Kuitenkin joillain yhdisteillä on havaittu, että spinodaalinen erottuminen tapahtuu erkanemisreaktiosta ensimmäisenä. Monissa johdinmateriaaleissa käytetty Cu-15Ni-8Sn-seos [49] [50] on yksi tutkituimmista spinodaalisesti hajoavista metalliseoksista. Seosta vanhentaessa on havaittu, että spinodaalinen hajoamisreaktio tapahtuu hajoamisreaktioista ensimmäisenä. Spinodaalisen reaktion ansiosta seoksen mikrokovuus jopa kaksinkertaistuu. Eräessä kokeessa [49] havaittiin spinodaalisen reaktion dominoivan Cu-15Ni-8Sn-seoksen mikrokovuuden nousua noin tunnin ajan, kun seosta vanhennettiin 370 °C:ssa. Tunnin vanhentamisen jälkeen eräs toinen karkaisureaktio alkoi vaikuttaa spinodaalisen hajoamisen rinnalla, ja seoksen mikrokovuuden kasvu alkoi hidastua. 120 minuutin vanhentamisen jälkeen seoksen mikrokovuus kääntyi laskuun. Spinodaalinen reaktio on siis Cu-15Ni-8Sn-seosta kovettavista reaktioista selvästi merkittävin.

4 Testipiirilevyn suunnittelu ja testaus

Testipiirilevyn suunnittelu käsitti sekä sopivien materiaalien ja oheiskomponenttien valinnan että piirikaavion ja piirilevyn reitityksen piirtämisen. Lopuksi tarvittavat komponentit ja paljas piirilevy tilattiin alihankkijoilta piirilevyn käsin kokoamista varten. Tässä luvussa testipiirilevyn suunnittelu- ja kokoamisprosessi käydään vaiheittain läpi. Lisäksi suunnitellaan sopiva testi, jolla piirilevyn suunnittelun onnistuneisuutta voidaan arvioida.

4.1 Oheiskomponenttien ja juotteen valinta

Testipiirilevyn suunnittelu alkoi paljaan piirilevyn lisäksi tarvittavien oheiskomponenttien kartoituksella. Piirilevyä varten tuli valita korkean lämpötilan kestävä

- liitin,
- nollavoima- eli testikanta ja
- suodatuskondensaattori.

Lisäksi tuli valita sopiva korkean lämpötilan kestävä juote, jolla yllämainitut osat voitiin kiinnittää paljaaseen piirilevyyn.

Liittimen valintaa rajoittivat olemassa olevat mittauselektroniikat. Testipiirilevy päätettiin tehdä pinniyhteensopivaksi erään mittauselektroniikan kaapelin kanssa, sillä työtä aloitettaessa kyseinen mittauselektroniikka näytti todennäköisimmältä vaihtoehdolta testipiirilevyn kanssa käytettäväksi. Mittauselektroniikan kaapelina oli käytetty joustavaa piirilevyä, jonka toisessa päässä oli mittauselektroniikkaan sopivat liittimet, ja toisessa päässä kortinreunaliitin testipiirilevyn yhdistämistä varten. Koska yhteyskaapeli oli suunniteltu näin, oli järkevää valita täysin yhteensopiva korkean lämpötilan kestävä kortinreunaliitin myös tässä työssä suunniteltavaan testipiirilevyyn. Piirilevyn vaatima liitin asennetaankin lopullisessa laitteistossa siis kaapelille, josta se kiinnittyy piirilevyn reunaan. Vaihtoehtoisesti voitaisiin myös suunnitella uusi emokortti, johon testipiirilevy asennettaisiin saman kortinreunaliittimen avulla. Emokortin avulla testipiirilevy olisi yhteensopiva myös toisen käytössä olevan mittauselektroniikan kanssa.

Mittauselektroniikan kaapelissa oli käytetty Sullins Corporationin 200-pinnistä kortinreunaliitintä ACB100DHHD [51]. Tätä liitintä ei voitu suoraan hyödyntää, sillä sen käyttölämpötila-alueeksi oli määritelty vain 150 °C. Liitinvalmistajan teknisen tuen avulla löydettiin kaksi hyvää vaihtoehtoa: FMB100DYHD [52] ja WMC65DRYH [53], joista ensimmäinen kestäisi 200 °C ja jälkimmäinen 250 °C lämpötilaa. Liittimen FMB100DYHD eristemateriaalina oli käytetty PPS:a ja johtavana materiaalina kullalla päällystettyä spinodaalista kupari-nikkeli-tina-seosta. Liittimen WMC65DRYH eristemateriaalina oli puolestaan käytetty PEEK:a ja johtavana materiaalina kullalla päällystettyä beryllium-nikkeliä. Molemmat eristemateriaalit kestävät hyvin korkeita käyttö-

lämpötiloja. Myös molemmat kontaktimateriaalit ovat ominaisuuksiltaan sopivia vaihtoehtoja korkeassa lämpötilassa käytettäviksi.

Liitin FMB100DYHD oli mitoiltaan ja pinnimäärältään täysin liittintä ACB100DHHD vastaava. Liittimessä WMC65DRYH pinnimäärä oli hieman pienempi, ja myös pinnien juotosalueiden sijainti oli hieman erilainen. Korkeammalle lämpötilalle tarkoitettu liitin WMC65DRYH oli lähes kymmenkertaisesti kalliimpi kuin matalamman lämpötilan liitin FMB100DYHD. Koska tehtävä testipiirilevy on vasta ensimmäinen prototyyppi, päätettiin tilata liittimistä halvempi, sillä se myös sopi mittauselektroniikan kaapeliin suoraan, eikä uutta kaapelia tarvinnut tehdä. Testipiirilevyn käyttölämpötila rajautui liitinvalinnan vuoksi 200 °C lämpötilaan, joka oli minimivaatimus. Hinta ja yhteensopivuus mittauselektroniikan kaapelin kanssa olivat kuitenkin korkeampaa käyttölämpötilaa tärkeimpiä kriteereitä tässä vaiheessa. Liitin WMC65DRYH on hyvä pitää muistissa jatkoa ajatellen. Pienillä kaapeliin tehtävillä muokkauksilla liittintä WMC65DRYH voitaisiin myös hyödyntää testilaitteistossa, jolloin liittimen ominaisuudet eivät rajoittaisi testin lämpötilaa. Jos testilaitteistossa haluttaisiin hyödyntää emokortin vaativaa mittauselektroniikkaa, emokortti voitaisiin suunnitella kummalle edellä esitellylle liittimelle tahansa.

Nollavoimakanta on yleinen ratkaisu testattavien tuotteiden asentamiseksi testipiirilevylle, kun levyä halutaan käyttää useamman kerran osia vaihdellen. Kannat asennetaan levyille esimerkiksi juottamalla, ja tuotteet asettuvat kantoihin erilaisten kiinnitysmekanismien, kuten jousien, avulla. Näin osat on helppo vaihtaa levyille tarvittaessa. Jos osat juotettaisiin suoraan levyille, olisi niiden vaihtaminen hankalaa, ellei jopa mahdotonta. Nollavoimakanta tulee valita siihen asennettavan tuotteen kotelon ja pinnimäärän mukaan. Tässä työssä kiihtyvyyssanturituotteen kotelona oli 14-pinninen DIP-kotelo (dual in-line package), jota nollavoimakannan pitäisi vastata.

Aries Electronics, Inc.:n valikoimasta löydettiin hyviä vaihtoehtoja levyllä käytettäväksi kannaksi. Kaikki Ariesin testikannat oli määritelty kestämään 250 °C käyttölämpötilaa, ja heidän valikoimastaan löytyi DIP-kotelolle sopivia nollavoimakantoja. Pienin tarjottu kanta oli kuitenkin tarkoitettu 24-pinniselle tuotteelle, eikä 14-pinniselle tarkoitettua kantaa ollut. Kannan rakenteen takia siihen voitaisiin myös asettaa kannan pinnimäärää pienempiä tuotteita, mutta tämä vaihtoehto veisi piirilevyltä paljon turhaa tilaa. Tilan säästämiseksi valittiinkin 32-pinninen kanta 32-6554-18 [54], johon voitaisiin asettaa kaksi tuotetta peräkkäin. Tämän ratkaisun ansiosta kantojen kappalemäärää voidaan vähentää puolella, ja tuotteet saadaan aseteltua levyille tehokkaammin. Valikoimista olisi löytynyt myös 28-pinninen kanta, mutta tuotteen kotelon mallin vuoksi kantaan ei olisi mahtunut kahta 14-pinnistä tuotetta. 32-pinninen nollavoimakanta oli pienin mahdollinen vaihtoehto, johon kaksi 14-pinnistä DIP-kotelo mahtuisi.

Tässä työssä etsittiin myös mahdollisia käyttöjännitteen suodatuskondensaattoreita asennettavaksi levyille. Levyn suunnittelun alkuvaiheessa ei ollut vielä varmaa, tultaisiinko kondensaattoreita lopulta asentamaan levyille, mutta kartoitus sopivien konden-

saattoreiden olemassaolosta koettiin kuitenkin tarpeelliseksi. Näin levyille osattaisiin reitityksen piirtovaiheessa varata oikeanlaiset paikat kondensaattoreiden mahdollista asentamista varten.

Saatavuuden ja toiminnan varmistamiseksi päätettiin etsiä vaihtoehdot sekä pintaliitoskondensaattorille että läpijuotettavalle kondensaattorille. Korkean käyttölämpötilan kesäviä pintaliitoskondensattoreita löytyi todella monella eri kotelokoolla, joista päätettiin valita suurehko 1210-kotelo. Tämän kotelokoon juotospisteille pystyttäisiin tilanteen vaatiessa kalustamaan myös hieman pienempi tai suurempi pintaliitoskondensaattori, jos alkuperäistä vaihtoehtoa ei olisikaan jostain syystä saatavilla. Läpijuotettavalle kondensaattorille varattu paikka piirilevyllä taas mahdollistaisi tarvittaessa erikoisemman kondensaattorin juottamisen levyille, esimerkiksi pienien johdinpätkien avulla.

Sopivia kondensattoreita etsittiin Digi-Keyn valikoimista. Molempien kondensaattorityyppien kriteerinä sopivan kotelon ja käyttölämpötilan lisäksi oli se, että niitä voisi ostaa yksittäiskappaleina. Korkean lämpötilan kondensaattorit ovat erikoistuotteita, joissa minimi-tilausmäärä voi olla tuhannesta muutamaan tuhanteen kappaleeseen. Koska yhteen levyyn tarvittavien kondensattoreiden määrä oli tässä tapauksessa vain muutama kymmenen, ei tuhansien kondensattoreiden tilaus heti ollut kovin järkevää. Yksittäiskappaleiden kappalehinta kohosi toki suurempiin eriin verrattuna huomattavan korkeaksi, mutta tilauksen kokonaiskustannus jäi silti pienellä määrällä tilattaessa huokeammaksi, kuin tuhansien kondensattoreiden tilaus.

Molemmat kondensaattorityypit löydettiin Kemetin valikoimista. Pintaliitoskondensaattoriksi valittiin C1210H104J1GACTU [55], jonka maksimikäyttölämpötilaksi ilmoitettiin 200 °C. Kondensaattorin nimelliskapasitanssi huoneenlämpötilassa oli 100 nF, ja lämpötilakerroin ± 30 ppm/°C. Kapasitanssin muutos, ja sitä kautta kapasitanssi maksimikäyttölämpötilassa voidaan määrittää käyttölämpötilan T_u ja referenssilämpötilan T_{ref} erotuksen ja lämpötilakertoimen avulla laskemalla

$$\Delta C = C_0 \beta (T_u - T_{ref}), \quad (9)$$

missä ΔC on kapasitanssin muutos, C_0 nimelliskapasitanssi huoneenlämpötilassa ja β kondensaattorin lämpötilakerroin. Maksimikäyttölämpötilassa kondensaattorin kapasitanssi olisi siis noin $100 \pm 0,525$ nF, mikä on riittävän tarkka käyttöjännitteen suodatus-ta varten. Kun otetaan huomioon kondensaattorin toleranssi ± 5 %, on kapasitanssin vaihtelu lämpötilan suhteen merkityksetön. Toleranssin rajoissa kondensaattorin kapasitanssi on noin 100 ± 5 nF, mikä on edelleen riittävän tarkka suodatuskondensaattorille.

Läpiladottavaksi kondensaattoriksi valittiin C052H104K5G5GAT500 [56]. Myös sen maksimikäyttölämpötila oli 200 °C, nimelliskapasitanssi 100 nF ja lämpötilakerroin ± 30 ppm/°C. Kaavan (9) avulla myös läpiladottavan kondensaattorin arvoksi sen maksimikäyttölämpötilassa saatiin noin $100 \pm 0,525$ nF. Läpiladottavan kondensaattorin toleranssi oli ± 10 %, eli nimelliskapasitanssi sillä voi olla noin 100 ± 10 nF. Valitut

kondensaattorit ovat lämpötilaominaisuuksiltaan täysin samanlaiset, joten kumpaa vaihtoehtoa tahansa voidaan tarvittaessa kalustaa piirilevylle. Pintaliitoskondensaattorin toleranssi oli hieman alhaisempi kuin läpilotettavan, joten sitä voidaan pitää ensisijaisena kondensaattorivaihtoehtona.

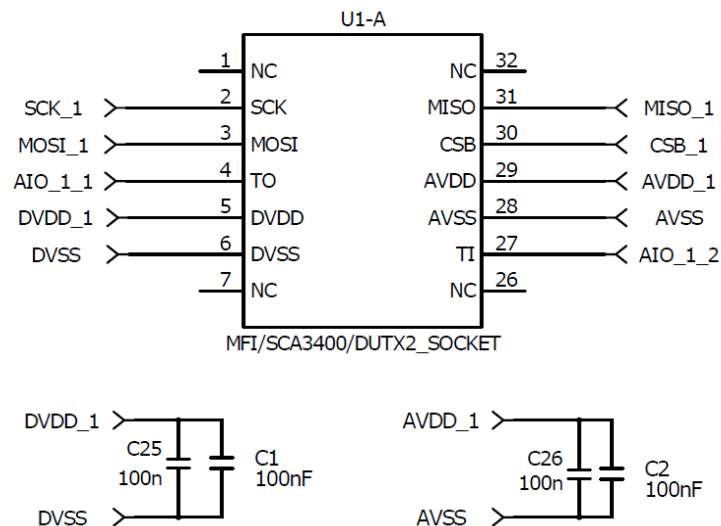
Nollavoimakanta ja kondensaattorit tulee kiinnittää piirilevylle juottamalla, mitä varten työssä piti myös valita sopiva korkean lämpötilan juote. Myös valittu liitin tulitaisiin kiinnittämään mittauselektroniikan kaapeliin juottamalla. Koska lyijyttömät juotemateriaalit ovat vielä ominaisuuksiltaan heikkoja korkeassa lämpötilassa, päätettiin juotteeksi valita jokin korkealyijypitoinen seos. Lisäksi kortinreunaliittimen valmistaja oli suositellut liittimen pinnien pinnoitteen kanssa käytettäväksi juotetta, joka sisältäisi runsaasti lyijyä [40]. Juotettaessa komponenttia kiinni juotospisteeseen sulavaan juotteen liukenee materiaalia sekä komponentin pinnan että juotospisteen pinnasta. Epätoivottujen metallienväliden yhdisteiden välttämiseksi päätettiin liitinvalmistajan suositusta pyrkiä noudattamaan. Erityisen hyviä tuloksia liitinvalmistaja oli saanut käyttämällä juotetta, jonka koostumus oli 10 % tinaa, 88 % lyijyä ja 2 % hopeaa, joten tavoitteeksi asetettiinkin samanlaisen juotteen käyttäminen.

Sopiva juoteseos löytyi Kesteriltä. Valitun juotteen koostumus oli kortinreunaliittimen valmistajan suosittelema 10Sn-88Pb-02Ag. Lisäksi juotelangan ytimessä oli juottamista helpottavaa juoksutetta.

4.2 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevyn suunnittelu aloitettiin piirikaaviosta. Ensimmäiseksi tuli ottaa huomioon mittauselektroniikan välikaapeli, jonka kanssa levyn oli oltava pinniyhteensopiva. Kaapelilla kulki 20 signaalia. Kaapelin vetojen määrän perusteella tuotteita olisi voinut olla piirilevyllä 20 kappaletta, sillä yhdeltä 14-pinniseltä kiihtyvyyssanturituotteelta tuli vetää mittauselektroniikalle 10 signaalia. Kaapelin mittauselektroniikan pää oli kuitenkin reititetty niin, että testipiirilevylle voitiin sijoittaa vain 12 tuotetta, muuten kakkia tarvittavia signaaleja ei saatu mittauselektroniikan päässä oikeaan paikkaan. Tuotteiden määrän rajaamisen jälkeen piirikaavion viimeistely oli hyvin suoraviivaista, sillä kortinreunaliittimen oikea pinnijärjestys voitiin katsoa välikaapelin piirikaaviosta. Kaikille käyttöjännitteille lisättiin tarvittavat suodatuskondensaattorit. Kuvassa 25 on esitetty yksityiskohta valmiista piirikaaviosta, joka on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä A.

DUT 1



Kuva 25: Testipiirilevyn piirikaavion osa. Yhdeltä kiihtyvyyssanturilta (DUT 1, device under test) tuotiin 10 erilaista signaalia. Molemmille käyttöjännitteille AVDD (analog drain voltage) ja DVDD (digital drain voltage) kytkettiin suodatuskondensaattorit niitä vastaavien maasignaalien AVSS (analog source voltage) ja DVSS (digital source voltage) välille.

Piirikaavion valmistuttua voitiin aloittaa piirilevyn reitityksen suunnittelu. Ensiksi valittiin sopivat ulkomitat. Piirilevyn piti olla mitoiltaan sellainen, että niitä mahtui testiuuniin useampi levy kerrallaan. Piirilevy liitettiin kaapeliin kortinreunaliittimellä, joten yksi levyn reunoista täytyi mitoittaa liittimelle sopivaksi. Levyn muodossa oli myös hyvä ottaa huomioon mahdollinen sille tulevaisuudessa suunniteltava kehikko, joka mahdollistaisi useamman levyn yhtäaikaisen käytön uunissa. Kehikkoa varten tuli varata sopivat kiinnityskohdat levyiltä jo etukäteen. Yhteensopivuuden ja edellä mainittujen syiden perusteella levystä päätettiin tehdä samanmuotoinen muiden yrityksessä käytettävien testipiirilevyjen kanssa. Näin esimerkiksi riittäisi suunnitella yksi kehikko, johon kaikki erityyppiset testipiirilevyt istuisivat.

Levyn mittojen varmistuttua levyn reunoista varattiin sopivat kieltoalueet mahdollista kehikkoa varten. Kieltoalueella tarkoitetaan aluetta, jolle ei tule komponentteja, vetoja eikä maa-alueita. Seuraavaksi kortinreunaliitin aseteltiin sille varattuun reunaan. Näin saatiin rajattua alue, jolle testikannat ja kondensaattorit sai asetella vapaasti. Kantojen asettelua ohjasi käytettävyys ja vetojen vetämisen helpottaminen. Jokaisen kannan kahvaan tuli päästä helposti käsiksi, joten kannat eivät saaneet olla liian lähellä toisiaan. Lisäksi kannat pyrittiin asettelemaan niin, että signaalivedot saataisiin vedettyä mahdollisimman helposti kannoilta kortinreunaliittimelle. Kantojen asattelun jälkeen voitiin sijoittaa suodatuskondensaattorit paikoilleen. Kondensaattorit pyrittiin asettamaan mahdollisimman lähelle kantojen pinnejä hyvän suodatuksen aikaansaamiseksi.

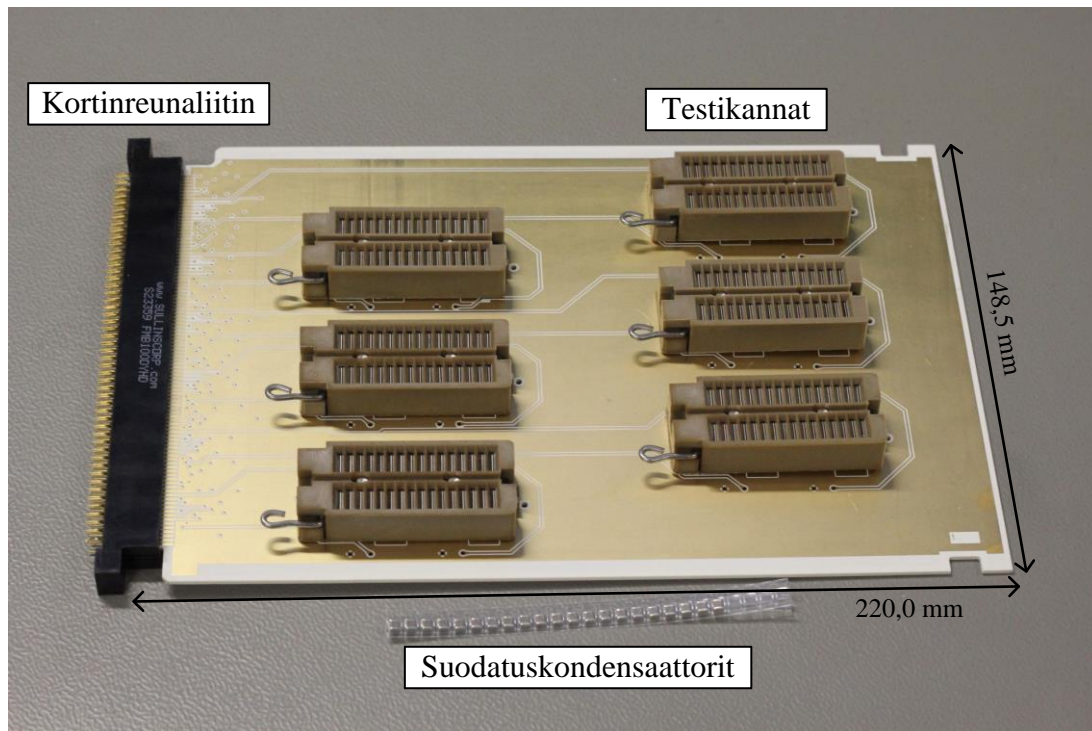
Komponenttien asettelun valmistuttua seuraava vaihe oli reitityksen suunnittelu. Ensiksi määritettiin sopivat eristevälit eli säännöt, kuinka lähelle toisiaan vedot, läpiviennit ja juotospisteet saivat asettua. Lisäksi määritettiin sopivat leveydet vedoille. Säännöt määriteltiin tuuman tuhannesosissa eli milseissä, jota on tapana käyttää reititysyksikkönä millimetrin sijaan. Eristeväliksi valittiin kokemuksen perusteella 10 mil (n. 0,254 mm), joka on piirilevyn valmistuksen kannalta turvallinen arvo. Minimiarvo eristevälille on kahdella piirilevyvalmistajalla 0,075 mm [57] [58], mutta on suositeltavaa käyttää tätä minimiä suurempaa arvoa levyvalmistuksen saannon parantamiseksi. Vetojen leveyksille esimerkkinä käytetyt piirilevyvalmistajat antoivat minimiksi 0,060 mm [57] [58], mutta lopullisen leveyden valintaan vaikutti eniten kokemus. Käyttöjännitevedot päätettiin reitittää 25 mil (n. 0,635 mm) leveällä vedolla, ja muut vedot tehtiin 15 mil (n. 0,381 mm) leveydellä. Maa-alueet yhdistettiin toisiinsa niin kutsutulla maakaadolla, eli piirilevyn kaikille signaalikerroksille lisättiin kuparikaato, joka yhdistettiin maahan. Näin toimimalla maasta saatiin mahdollisimman hyvä ilman erillistä maakerrosta. Levy päätettiin reitittää neljässä signaalikerroksessa, joten valittiin kaksi kerrosta analogiamaata ja sitä vastaavia signaalivetoja varten, ja vastaavasti kaksi kerrosta digitaalimaata ja sitä vastaavia signaalivetoja varten. Kuvat valmiista reitityksestä on esitetty liitteessä B.

Reitityksen valmistuttua levy oli valmis tilattavaksi. Paljaat piirilevyt päätettiin tilata tutulta yhteistyökumppanilta, ME PCB AB:lta. Tilausta varten piti vielä määrittää käytettävä eristemateriaali ja pinnoite sekä piirilevyn paksuus. Lisäksi piirilevyn reunaa pyydettiin viistontamaan kortinreunaliittimen kohdalta liittimen kortille asettamisen helpottamiseksi. Eristemateriaaliksi valittiin ME PCB:n suosituksen ja oman taustaselvityksen perusteella Rogers Corporationin keraamipohjainen RO4350B/RO4450F [28] [59]. RO4350B:tä käytettiin levyn ytimessä eristemateriaalina, ja RO4450F oli levyn valmistuksessa käytetty sidoskerrosmateriaali, jolla eriste- ja johdekerrokset laminoitiin toisiinsa kiinni. Kummankin eristemateriaalin lasitransformaatiolämpötila on yli 280 °C, jonka pitäisi olla riittävä levyn käyttötarkoitusta ajatellen.

Valmista korttia ja kortinreunaliitintä joudutaan asettamaan ja irrottamaan useita kertoja toisistaan, mikä aiheuttaa mekaanista rasitusta levyn kontaktialueiden pinnoitteelle. Koko piirilevyn kontakti- ja juotosalueiden pinnoitteeksi valittiin tästä johtuen kovakultaus, jonka tiedetään kestävän kortinreunaliittimen aiheuttamaa rasitusta tavallista nikkeli-kulta-pinnoitetta paremmin. Suodatuskondensaattorien juotosalueille nikkeli-kulta-pinnoite olisi ollut riittävä, mutta valmistusteknisistä syistä koko levy on pinnoitettava samalla materiaalilla.

Piirilevyn paksuutta rajoitti kortinreunaliitin, johon piirilevyn oli sovittava. Kortinreunaliittimen datalehdessä luettiin, että levyn paksuuden tulisi olla 1,37 – 1,77 mm [52]. Tyypillinen piirilevyn paksuus on 1,6 mm, mutta eristemateriaalivalinnasta johtuen piirilevyvalmistaja suositteli levyn paksuudeksi 1,414 mm ± 10 %. Tämä luku ei vielä sisällä eristeen molemmin puolin olevia kuparikerroksia, eikä näiden kuparikerrosten kasvatusa. Kuparikerrosten paksuus oli 18 µm per kerros. Lopullisen piirilevyn paksuus

kortinreunaliittimen kohdalla oli siis noin 1,45 mm lukuun ottamatta kasvatettua kuparia. Kasvatetun kuparin paksuutta ei pidetty merkittävänä piirilevyn kokonaispaksuuden kannalta. Poikkileikkauskuva piirilevyn rakenteesta on esitetty liitteessä C. Kuvassa 26 on esitetty valmis piirilevy.



Kuva 26: Valmis paljas piirilevy oheiskomponentteineen.

4.3 Piirilevyn testauksen suunnittelu

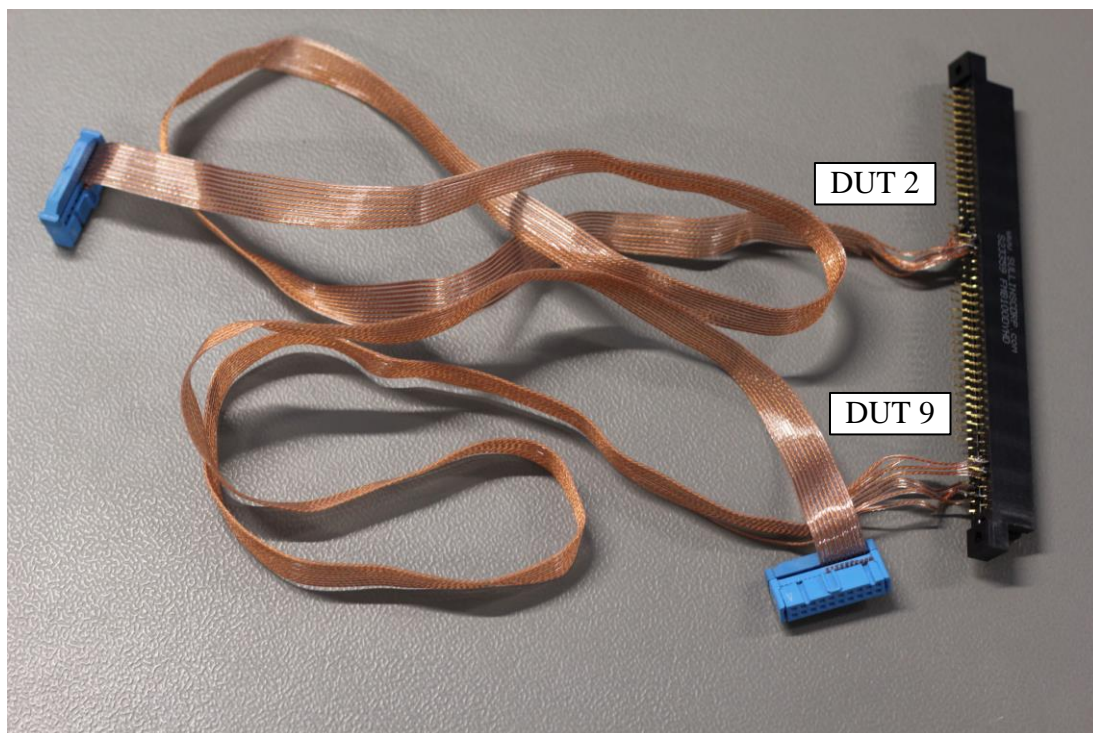
Valmista testipiirilevyä haluttiin myös koekäyttää, sillä paljaaseen piirilevyyn valituista materiaaleista ja komponenteista ei ollut aikaisempaa käyttökokemusta. Kaikki valitut testipiirilevyn osat vaikuttivat ominaisuuksiltaan sopivilta korkeassa lämpötilassa käytettäviksi, mutta lopullinen varmistus voitiin saada vain kokeilemalla.

Tässä työssä suunniteltua testipiirilevyä tullaan käyttämään 24 tunnin vanhennustestissä, joten levyn toiminta varmennettiin samankaltaisella kokeella. Levyä päätettiin vanhentaa uunissa 10 kertaa 24 tuntia kerrallaan ja seurata, kestäkö levy vanhennuksien aiheuttaman lämpörasituksen vikaantumatta. Levyn minimilämpötilankeston tavoitteeksi oli asetettu 200 °C, joten vanhennustestin huippulämpötilaksi valittiin 200 °C. Vanhennustestin lämpötilaprofiili noudatti kuvan 9 mallia. Yhteen vanhennustestiin kului aikaa hieman yli 24 tuntia, sillä paiston kesto $t_b = 24 h$ ei sisällä uunin lämmittämiseen ja jäädyttämiseen kuluvaa aikaa.

Todellisia testipiirilevyllä testattavia kiihtyvyyssanturituotteita ei ollut saatavilla näiden testien aikana, joten levyille asetettiin tehovastuksia mallintamaan tuotetta. Vastukseksi

valittiin Vishay Dalen 100 ohmin RS010100R0FE73 [60]. Vastukset asetettiin testikantaan sekä analogiakäyttöjännitteen AVDD ja analogiamaan AVSS että digitaalikäyttöjännitteen DVDD ja digitaalimaan DVSS välille. Molemmat käyttöjännitteet tuotiin levyille vanhennuksien ajaksi, jolloin molempiin käyttöjännite- ja maalinjoihin saatiin kulkemaan virta testin aikana. Näin toimimalla testipiirilevyllä vallitseva olosuhde vanhennustestin aikana vastasi paremmin todellista loppukäyttösovelluksen tilannetta.

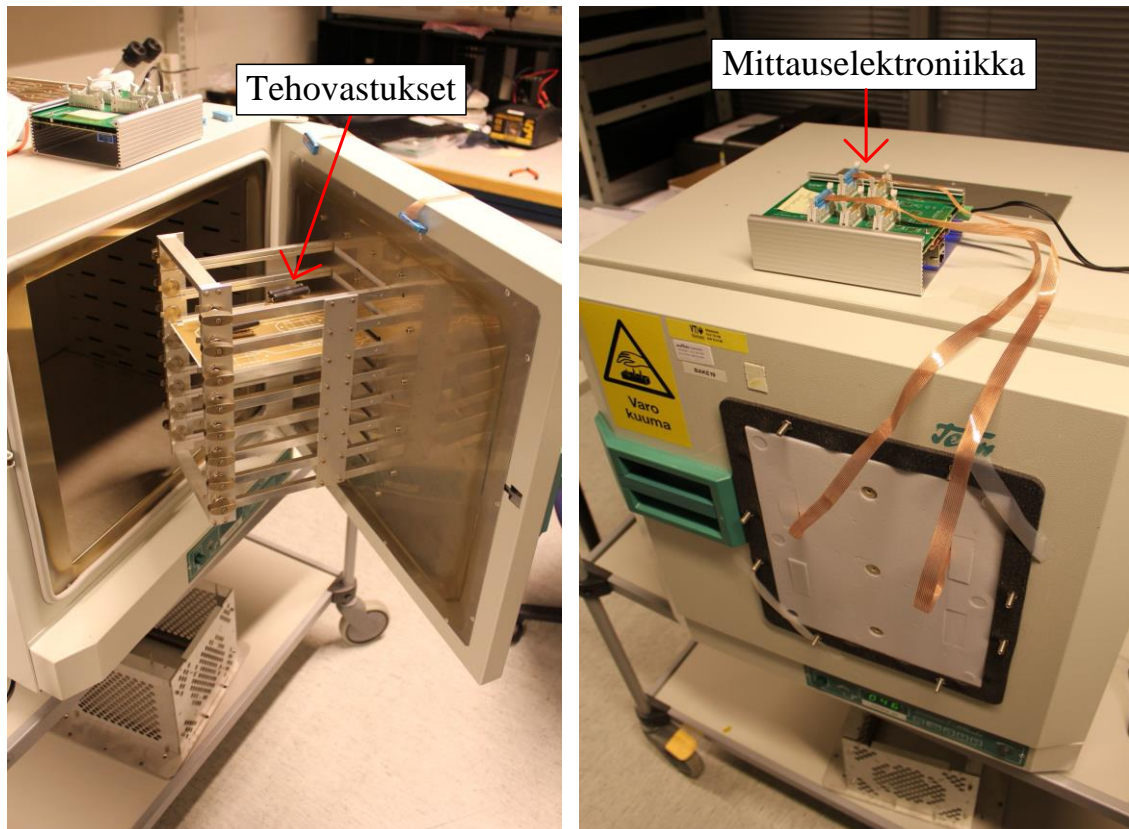
Testien aikana saatavilla ei myöskään ollut kumpaakaan mittauselektroniikkaa, joille testipiirilevy oli suunniteltu. Koska testien aikana haluttiin vain tuoda käyttöjännite piirilevyille, voitiin käyttää lähes mitä tahansa saatavilla olevaa mittauselektroniikkaa. Valitun mittauselektroniikan ja testipiirilevyn kortinreunaliittimen välille rakennettiin yhteyskaapeli korkeaa lämpötilaa kestävästä lattakaapelista. Valmis yhteyskaapeli on esitetty kuvassa 27. Kaapeli kiinnitettiin suoraan kortinreunaliittimen pinneihin juottamalla. Ympäröiviä käyttämättömiä pinnejä katkottiin sivuleikkurilla juottamisen helpottamiseksi. Testielektroniikka asetettiin uunin ulkopuolelle, joten kaapelin toiseen päähän voitiin asentaa tavalliset lattakaapeliliittimet, jotka olivat yhteensopivat mittauselektroniikan liittimien kanssa. Mittauselektroniikka ohjelmoitiin asettamaan käynnistyksessä sekä analogia- että digitaalikäyttöjänniteulostulonsa 3,3 volttiin.



Kuva 27: Kortinreunaliittimeen kiinnitetty yhteyskaapeli.

Vanhennustestejä varten saatiin käyttöön Termaksin uuni TS 8056. Uuniin oli rakennettu oven kiinnittyvä teline, johon testipiirilevy sopi. Kuvassa 28 on ulko- ja sisäpuolelta valokuvattu uuni, johon testipiirilevy on asetettu. Kortinreunaliitin asetettiin ulkopuolelta ovensa olevaan aukkoon, ja piirilevy painettiin uunin sisäpuolelta kiinni liittimeen. Oven aukko peitettiin eristävällä materiaalilla, jonka läpi yhteyskaapeli tuotiin. Mittaus-

elektroniikka laitettiin uunin päälle testin ajaksi. Ennen testin käynnistämistä mitattiin yleismittarilla jännitteet jokaisen tehovastuksen yli. Näin varmistettiin, että kortinreuna-liitin on kytketty hyvin ja yhteyskaapeli on ehjä.



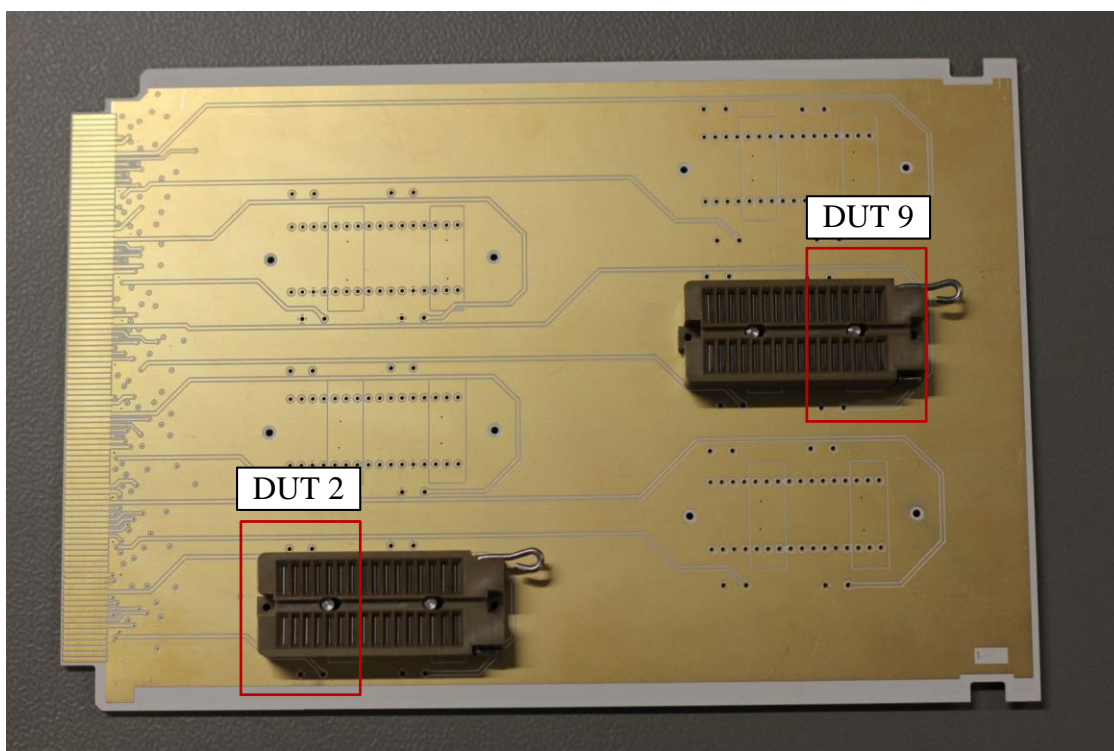
Kuva 28: Vanhennustesteissä käytetty uuni.

Testi aloitettiin käynnistämällä uuni, ja asettamalla käsin tavoitelämpötilaksi 200 °C. Käynnistysaika kirjattiin ylös. Uuni lämmitti itsensä tavoitelämpötilaan niin nopeasti kuin oli mahdollista tavoitelämpötilaa ylittämättä. Tämä tarkoitti sitä, että alussa uunin lämpötila nousi nopeasti ja lähempänä tavoitelämpötilaa nousu oli hitaampaa. Aika jolloin uuni saavutti tavoitelämpötilan, kirjattiin ylös. Testin lopetus suoritettiin samoin. Kun 24 tuntia oli kulunut tavoitelämpötilan saavuttamisesta, asetettiin uunille uudeksi tavoitelämpötilaksi 25 °C. Levy poistettiin uunista noin kahden tunnin kuluttua, kun uusi tavoitelämpötila oli saavutettu. Poistoajankohtaa ei kirjattu ylös.

Testien tavoitteeksi asetettiin testipiirilevyn toiminnan varmistaminen, eli haluttiin suorittaa niin kutsuttu ”proof of concept”-testi. Oletuksena oli, että levyn materiaalit on valittu riittävän hyvin, ja levy komponentteineen kestää testin aiheuttaman rasituksen. Heikkona kohtana pidettiin juoteliitoksia, ja mahdollisen levyn rikkoutumisen pääteltiin alkavan niistä. Juotettaessa liitoksiin on voinut syntyä metallien välisiä yhdisteitä, joista liitoksen ikääntyminen tyypillisesti alkaa. Oletuksena oli, että jännitteiset linjat AVDD ja DVDD kuluisivat käytössä nopeammin jännitteettömiin SPI-linjoihin verrattuna, ja mahdollinen juoteliitoksen vika myös havaittaisiin todennäköisimmin jossain käyttö-

jännitelinjassa. Oletettiin myös, että valittu vanhennuksien määrä ei kuitenkaan ole riittävä vikaannuttamaan piirilevyä.

Testipiirilevyn toimintaa valvottiin kahdella eri tapaa vanhennustestien välissä. Levyn kulumista seurattiin visuaalisesti ja lisäksi valituilta tuotepaikoilta mitattiin resistanssia. Visuaaliseen seurantaan kuului koko piirilevyn valokuvaaminen esimerkiksi värimuutoksien havaitsemiseksi. Tuotepaikkojen juotoksista otettiin myös valokuvia mikroskoopin avulla, jotta mahdollinen juoteliitoksen rikkoutuminen voitaisiin havaita. Seurattaviksi tuotepaikoiksi (DUT) valittiin kuvaan 29 merkityt paikat 2 ja 9. Paikka 2 valittiin, koska sille johtavat linjat ovat lyhyitä ja paikka sijaitsee levyn reunassa. Paikka 9 puolestaan valittiin, koska sille johtavat linjat ovat pitkiä ja paikka sijaitsee levyn keskellä. Tuotepaikkojen sijoittelun puolesta seurattiin siis kahta erilaista tapausta.



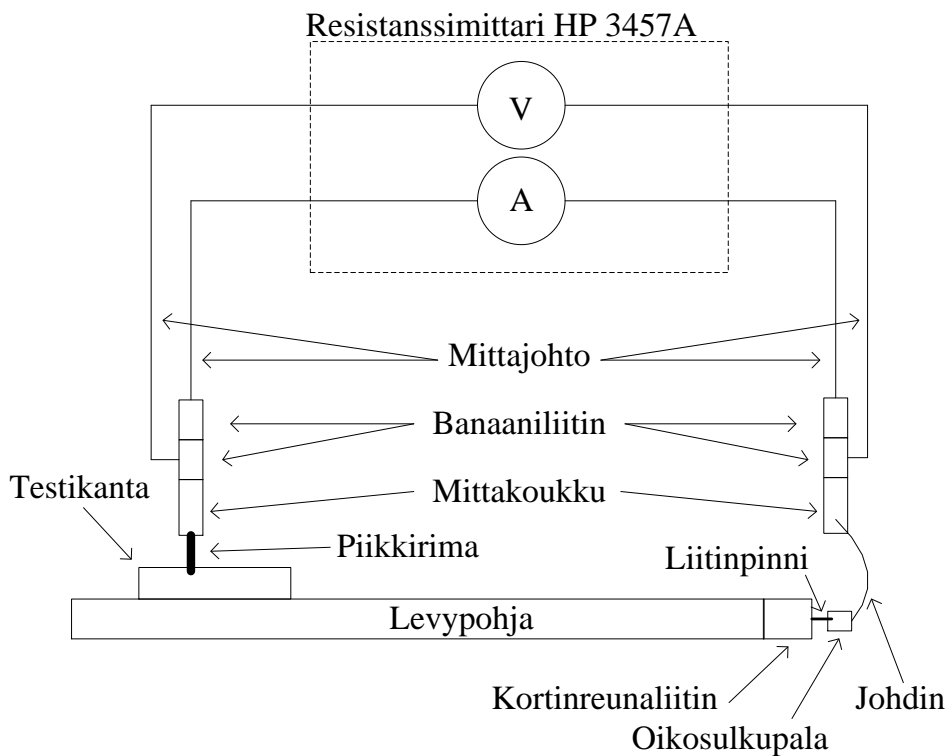
Kuva 29: Seurattavat tuotepaikat.

Molemmilta tuotepaikoilta seurattiin kahdeksaa linjaa: analogia- ja digitaalikäyttöjännitelinjaa, niitä vastaavia maalinjoja, sekä kaikkia SPI-väylän linjoja. Käyttöjännitelinjat oli reititetty SPI-väylän linjoja huomattavasti paksummalla vedolla, ja maalinjat oli toteutettu kaadoilla. Näin molemmilta tuotepaikoilta pystyttiin seuraamaan kolmea erilaista tapausta. Yhteensä resistanssimittauksissa saatiin siis tietoa kuudesta keskenään erilaisesta linjasta. Seurattavien linjojen ominaisuudet on eritelty taulukossa 4.

Taulukko 4: Vanhennustestien välillä seurattavien linjojen ominaisuudet.

Tuotepaikka	DUT 2			DUT 9		
Linja	SPI	AVDD/ DVDD	AVSS/ DVSS	SPI	AVDD/ DVDD	AVSS/ DVSS
Vedon paksuus	Ohut	Paksu	Kaato	Ohut	Paksu	Kaato
Jännitteinen vanhennuksessa	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Linjan pituus	Lyhyt	Lyhyt	Lyhyt	Pitkä	Pitkä	Pitkä

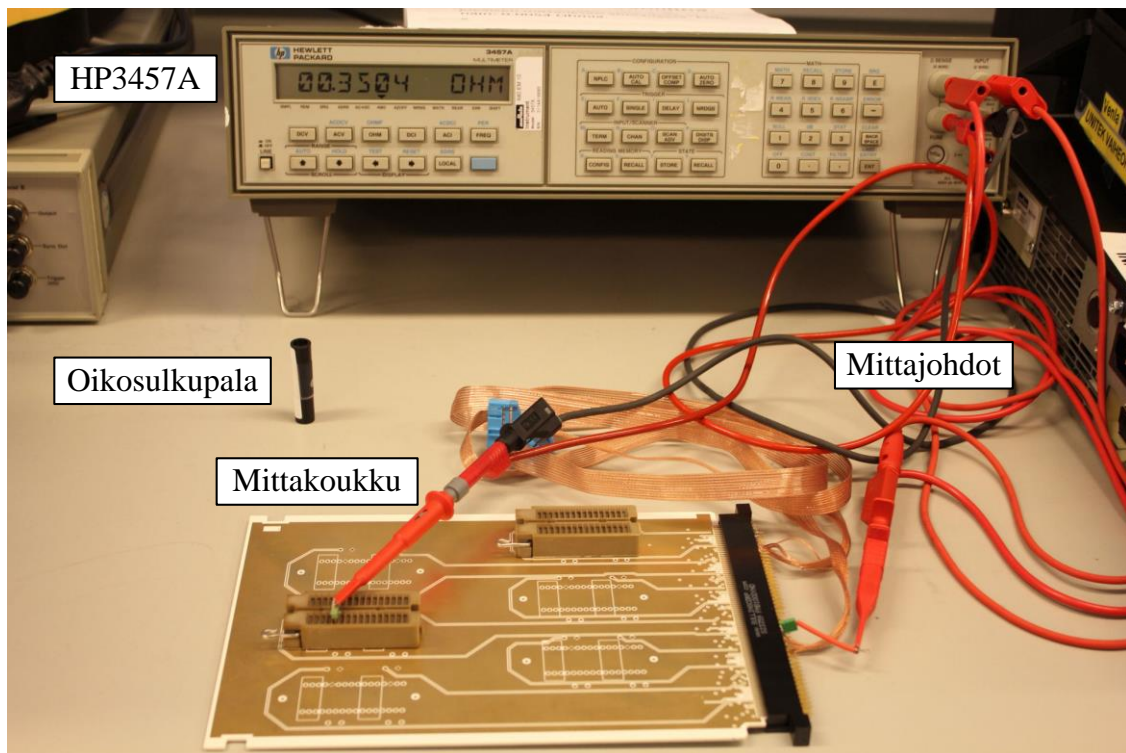
Seurattavien linjojen resistanssia mitattiin vanhennuksien välillä nelipistemittauksella. Äkillinen resistanssin muutos kertoisi, jos linja vaurioituisi. Tässä tapauksessa linjaksi nimitettiin signaalireittiä testikannalta piirilevyn vedon kautta kortinreunaliittimen pinniin asti. Vanhennustestin aikana käytetyt tehovastukset poistettiin testikannoista resistanssimittauksien ajaksi. Resistanssin mittaukseen käytetty mittalaitteisto on havainnollistettu kaaviossa 30, todellinen laitteisto on esitetty kuvassa 31. Testikannan päässä mittauksissa käytettiin apuna piikkirimaa, joka asetettiin mitattavana olevan linjan paikalle. Mittajohtojen päät kiinnitettiin mittakoukulla piikkirimaan. Kortinreunaliittimen päässä käytettiin apuna oikosulkupalaa, johon juotettiin kiinni pätkä johdinta. Oikosulkupala kytkettiin kortinreunaliittimen pinniin ja mittajohtojen päät kiinnitettiin johtiin mittakoukulla. Samaa piikkirimaa käytettiin kaikkien mittauksien aikana, mutta oikosulkupala jouduttiin vaihtamaan kaksi kertaa, koska käytössä oikosulkupalan muovi murtui eikä pala enää asettunut tiukasti liittimen pinniin.



Kuva 30: Kaavio resistanssin mittaukseen käytetystä laitteistosta.

Mittarina käytettiin Hewlett Packardin 3457A monitoimimittaria. Mittarilla suoritettiin automaattinen kalibrointitoimenpide ennen ensimmäistä mittauskertaa, jonka jälkeen

mittaria ei sammutettu ennen mittauksien päättymistä. Mittauksien toistettavuuden varmistamiseksi jokaista mittauksia ennen mitattiin laitteiston johtojen resistanssi oikosulkupalan avulla. Oikosulkupala asetettiin banaaniiliitinten välille, ja niin kutsuttu oikosulkuresistanssi kirjattiin ylös. Mittajohtojen resistanssin mittauksen jälkeen johdot pyrittiin pitämään mahdollisimman paikallaan varsinaisten resistanssimittausten aikana. Oikosulkuresistanssin arvo vähennettiin linjojen mitatuista resistanssiarvoista lopullisia tuloksia varten. Näin toimimalla johtojen liikuttelun aiheuttama resistanssin muutos saatiin poistettua lopullisista tuloksista. Koska oikosulkuresistanssi mitattiin banaaniiliitinten väliltä, tuloksissa esitetyt resistanssiarvot sisältävät todellisuudessa mitatun linjan resistanssin lisäksi myös mittakoukkujen, piikkiriman, oikosulkupalan ja johdinpätkän resistanssit.



Kuva 31: Työssä käytetty mittalaitteisto. Mittajohtojen resistanssi määritettiin ennen mittauksia oikosulkupalan avulla.

Kaikki valitut linjat mitattiin jokaisen vanhennuksen jälkeen kuusi kertaa. Jokaisen mittauksen välissä mittakoukut irrotettiin, piikkirima ja oikosulkupala poistettiin, ja sitten asetettiin uudelleen paikoilleen. Näin toimimalla pyrittiin keskiarvoistamaan mittaustuloksia, sillä linjojen resistanssin tarkka arvo vaihteli suuresti riippuen siitä, miten piikkirima, oikosulkupala ja mittakoukut asetettiin. Osien uudelleen asettamisen jälkeen mittarin annettiin asettua hetki, ennen kuin resistanssimittauksen tulos luettiin mittarilta.

5 Testitulokset ja arviointi

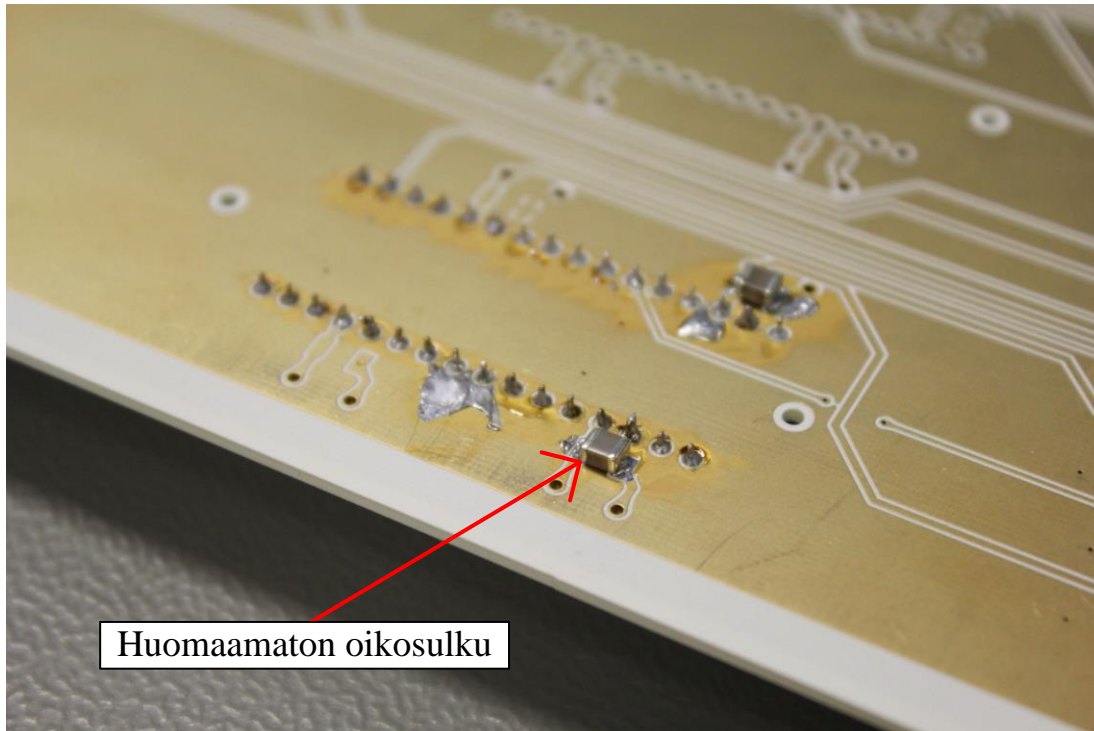
Tässä luvussa esitellään ja arvioidaan työssä saavutetut tulokset. Ensiksi käydään läpi, kuinka testipiirilevyn käyttöönotto testejä varten onnistui, ja kerrotaan, mitä puutteita levyssä havaittiin testien aikana. Tämän jälkeen esitetään resistanssimittausten ja visuaalisen seurannan tulokset kaavioina ja kuvina. Lopuksi kaikki tuloksia arvioidaan ja verrataan työn alussa asetettuihin tavoitteisiin. Lisäksi esitetään tulosten perusteella parannusehdotuksia testipiirilevyyn, ja pohditaan, miten työn tuloksia voidaan käyttää hyödyksi jatkossa.

5.1 Piirilevyn käyttöönotto

Testipiirilevy suunniteltiin valmistettavaksi tavallisen juotteenestopinnoitteen kanssa, joten eristevälit levyllä voitiin valita pieniksi. Levyn tilausprosessin aikana kävi ilmi, että juotteenestopinnoite ei todennäköisesti kestä testin vaatimaa korkeaa käyttölämpötilaa. Levyt oli jo ehditty tilata juotteenestopinnoitteen kanssa, eikä paljaaseen piirilevyyn tehty muutoksia tilauksen toisella kierroksella, kun juotteenestopinnoite päädyttiin jättämään levystä kokonaan pois. Tämä osoittautui myöhemmin virheeksi.

Juotteenestopinnoitteen tarkoitus on estää juotteen tarttuminen levyllä niihin kohtiin, joihin juotetta ei haluta. Juotteenestopinnoite sijoitetaan tavallisesti koko piirilevyn pinnalle siten, että vain komponenttien juotosalustat jäävät ilman pinnoitetta. Näin toimies- sa komponenttien kiinnijuottaminen on helpompaa, kun juotteenestopinnoite estää juoteroiskeiden aiheuttamien ei-haluttujen oikosulkujen muodostumisen esimerkiksi juotosalustan ja sen vieressä kulkevan johtimen välille. Juotteenestopinnoite on erityisen hyödyllinen silloin, kun levyn päällis- tai pohjakerroksen tyhjät alueet on täytetty maakaadolla. Maakaatoa käytettäessä komponentin juotosalustan ja kuparikaadon välissä on vain eristevälin suuruinen rako. Ilman juotteenestopinnoitetta juote karkaa helposti juotosalustalta kuparikaadolle muodostaen oikosulun niiden välille, varsinkin jos eristeväli on pieni.

Juotteenestopinnoitteen poisjätö levyllä vaikeutti sen kalustamista huomattavasti. Eristevälin ollessa vain 10 mil, juote karkasi juotosalustalta todella helposti maakaadon päälle aiheuttaen mahdollisen oikosulun. Kuvassa 32 näkyy muutama epäonnistunut juotoskohta. Kun levyllä kytkettiin ensimmäisen kerran käyttöjännitteet, huomattiin että jännitteet eivät kulkeudu mittauselektronikalta testikannoille kytketyille tehovastuksille asti oikein. Syyksi paljastui huomaamatta jäänyt oikosulku analogiakäyttöjännitteen ja digitaalimaan välillä.



Kuva 32: Epäonnistuneita juotoskohtia.

Oikosulku oli muodostunut analogiajännitteen suodatuskondensaattoria juotettaessa. Kondensaattorin analogiajännitteeseen kytketyltä juotosalueelta oli karannut juotetta kondensaattorin alle ja kiinnittynyt levyn pohjakerroksen digitaalimaakaatoon. Jos levyllä olisi ollut juotteenestopinnoite, se olisi estänyt tämän kaltaisen oikosulun muodostumisen.

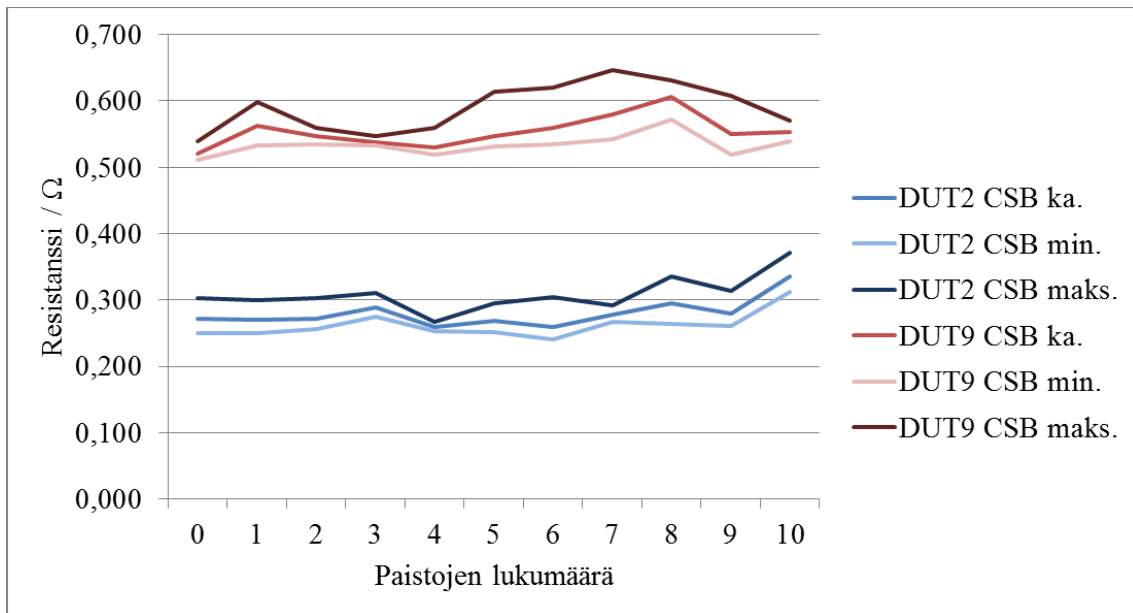
Testipiirilevyn kalustuksessa jouduttiin lisäksi käyttämään tavallista tehokkaampaa, paksukärkistä kolvia juotteen korkean sulamislämpötilan vuoksi. Isolla kolvinkärjellä oli hankala juottaa tarkasti, mikä vaikeutti kalustuksen onnistumista entisestään. Tulevaisuudessa olisi syytä harkita erikoistehokkaan, pienikärkisen juotosaseman hankkimista tämän piirilevyn kalustusta varten.

Juotteenestopinnoitteen poistaminen levytä aiheutti myös silkkipainatuksen puuttumisen, sillä silkkipainatusta ei voitu tehdä suoraan metallikerroksen päälle. Kaikki levyn tunnistetiedot, kuten järjestysnumero ja levyn nimi, oli sisällytetty silkkipainatukseen, joten testipiirilevy jäi kokonaan ilman tunnistetietoja.

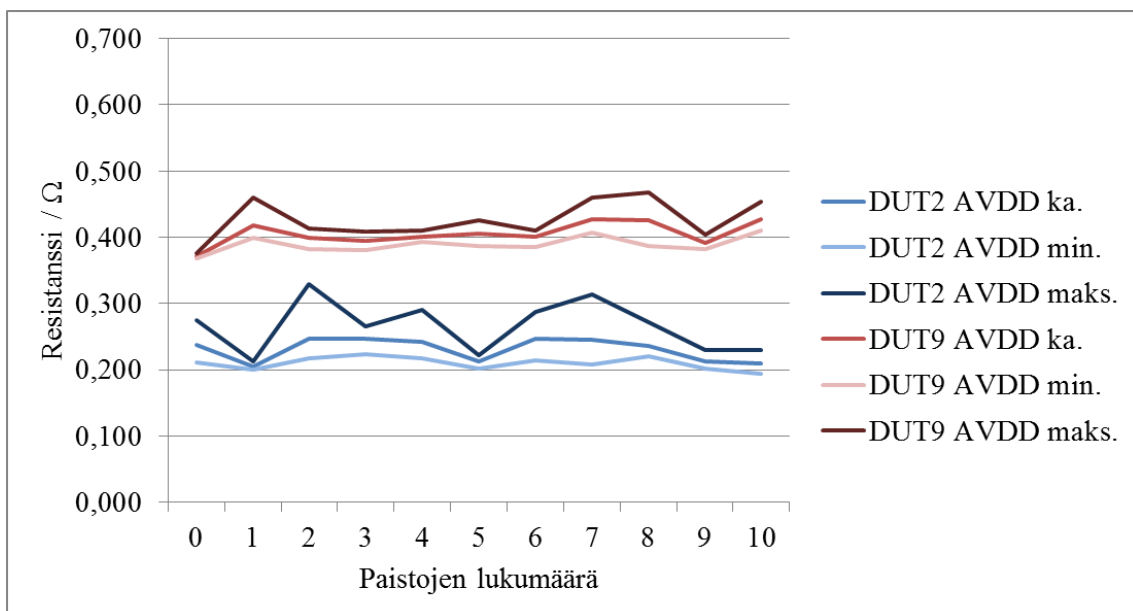
5.2 Resistanssimittaukset

Testipiirilevyn resistanssien mittaustulokset koottiin kuvaajiksi mahdollisten muutosten havaitsemiseksi. Kuvaajiin merkittiin jokaisen mittauskerran keskiarvo, minimi ja maksimi, joista vähennettiin mittauskerran alussa määritetty johtojen oikosulkuresistanssi. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty CSB- ja AVDD-linjojen mittaustuloksista saadut kuvaajat.

Muiden linjojen mittaustuloksien kuvaajat on esitetty liitteessä D. Resistanssimittauksista voitiin päätellä, että kaikki seurattavat linjat säilyivät vanhennuksien aikana ehjinä, sillä kaikkien linjojen resistanssiarvot pysyivät likimain muuttumattomina. Linjan vaurioituminen olisi näkynyt avoimena kytkentänä, eli resistanssiarvo olisi noussut hyvin suureksi.



Kuva 33: CSB-linjojen resistanssit vanhennuksien välissä.



Kuva 34: AVDD-linjojen resistanssit vanhennuksien välissä.

Kuvista 33 ja 34 nähdään, että resistanssiarvot eivät pysyneet täysin vakioina mittauksesta toiseen, vaikka suuria muutoksia ei havaittu. Resistanssimittauksien toistettavuus oli melko huono, mikä osaltaan selittää arvojen vaihtelua. Kuvista nähdään, että keskiarvon muutos seuraa useimmissa tapauksissa ääriarvojen, erityisesti maksimin, muutosta. Maksimiarvoissa esiintyvät piikit ovat mitä todennäköisimmin mittausvirheitä, jotka

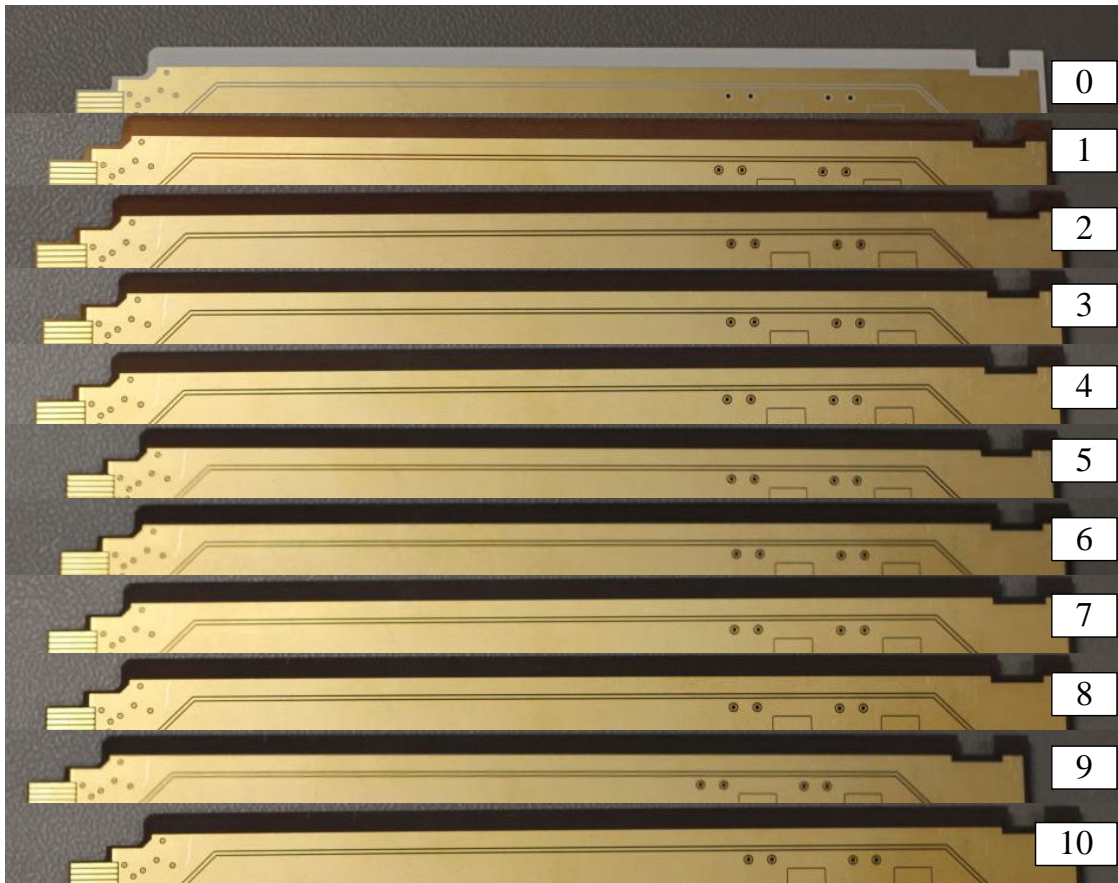
ovat aiheutuneet joko mittapäiden tai mittauksessa apuna käytetyn piikkiriman tai oikosulkupalan huonosta kontaktista. Minimiarvoissa ei havaittu vastaavanlaisia piikkejä.

Mittauksia tehdessä huomattiin, että resistanssi muuttui herkästi johtoja ja mittapäitä liikutettaessa, mikä on voinut lisätä tuloksien vaihtelevuutta. Tärkeä huomio oli myös, että niistä linjoista, joissa kortinreunaliittimen pinniin oli joutunut paljon juotetta yhteyskaapelia kiinnitettäessä, saatiin yhteneväisempiä tuloksia kuin linjoista, joiden liitinpinnit olivat säilyneet puhtaina. On mahdollista, että paljaat pinnit ovat hapettuneet juotteella päällystettyjä pinnejä herkemmin, jolloin hapettuneen kerroksen kuluminen ja uudelleen hapettuminen olisi aiheuttanut vaihtelevuutta mittaustuloksiin. Toisaalta pinnit, joissa juote oli levinnyt niiden kärkeen asti, olivat läpimitaltaan paksumpia kuin juotteesta puhtaat pinnit, mikä on helpottanut oikosulkupalan asettamista liitinpinniin mittauksia tehtäessä. Oikosulkupalat löystyivät käytössä nopeasti, joten pala asettui pinniin sitä tukevammin, mitä paksumpi pinni oli.

Useammista mittaustarkkuuteen vaikuttavista ongelmista huolimatta mittausten tuloksia voidaan pitää johdonmukaisina. Mittaustuloksista nähdään selvästi, milloin on mitattu lyhyitä linjoja (DUT 2) ja milloin pitkiä (DUT 9), sillä pääsääntöisesti lyhyiden linjojen resistanssit olivat pitkien linjojen resistansseja pienempiä. Poikkeuksen tekevät maalinjat, joiden resistanssit olivat likimain samat mittaustaikasta riippumatta, kuten hyvän maan tapauksessa kuuluukin. Mittaustuloksista erottui myös linjojen paksuuden vaihtelu. Ohuempien SPI-linjojen SCK, MOSI, MISO ja CSB resistanssit olivat paksuja käyttöjännitelinjoja AVDD ja DVDD selvästi suurempia. Maakaatoja AVSS ja DVSS voidaan pitää käyttöjännitelinjoja paksumpina vetoina, ja maalinjojen resistanssit olivatkin kaikista pienimpiä.

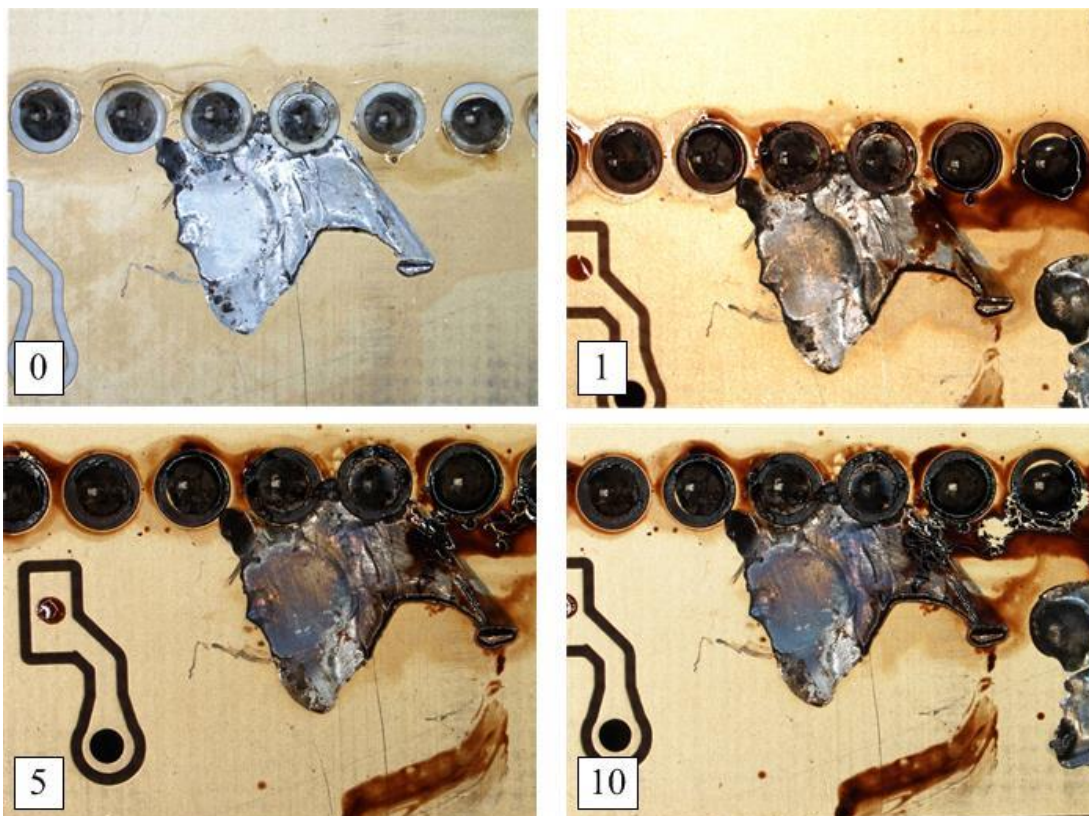
5.3 Piirilevyn visuaalinen seuranta

Testipiirilevy valokuvattiin ennen vanhennuksien aloittamista sekä jokaisen vanhennuksen jälkeen. Kuvasta 35 nähdään, kuinka piirilevyn väri kehittyi vanhennuksien aikana. Ennen vanhennuksia paljaan piirilevyn eristemateriaali oli väriltään valkoinen. Jo ensimmäisen vanhennuksen jälkeen eristemateriaali oli tummunut huomattavasti. Kuvassa piirilevyn vasen reuna oli vanhennuksissa lähellä uunin ovea, ja oikea reuna oli likimain keskellä uunia. Keskellä uunia ollut oikea reuna oli ensimmäisen vanhennuksen jälkeen tummempi, kuin oven lähellä ollut vasen reuna. Seuraavien vanhennuksien jälkeiset värimuutokset olivat maltillisempia. Levyn eri päiden väriero oli havaittavissa vielä neljännen vanhennuksen jälkeen. Viidennen vanhennuksen jälkeen molemmat piirilevyn päät olivat yhtä tummia, eikä havaittavia värimuutoksia enää tapahtunut. Levyn kullailla pinnoilla ei havaittu muutoksia.

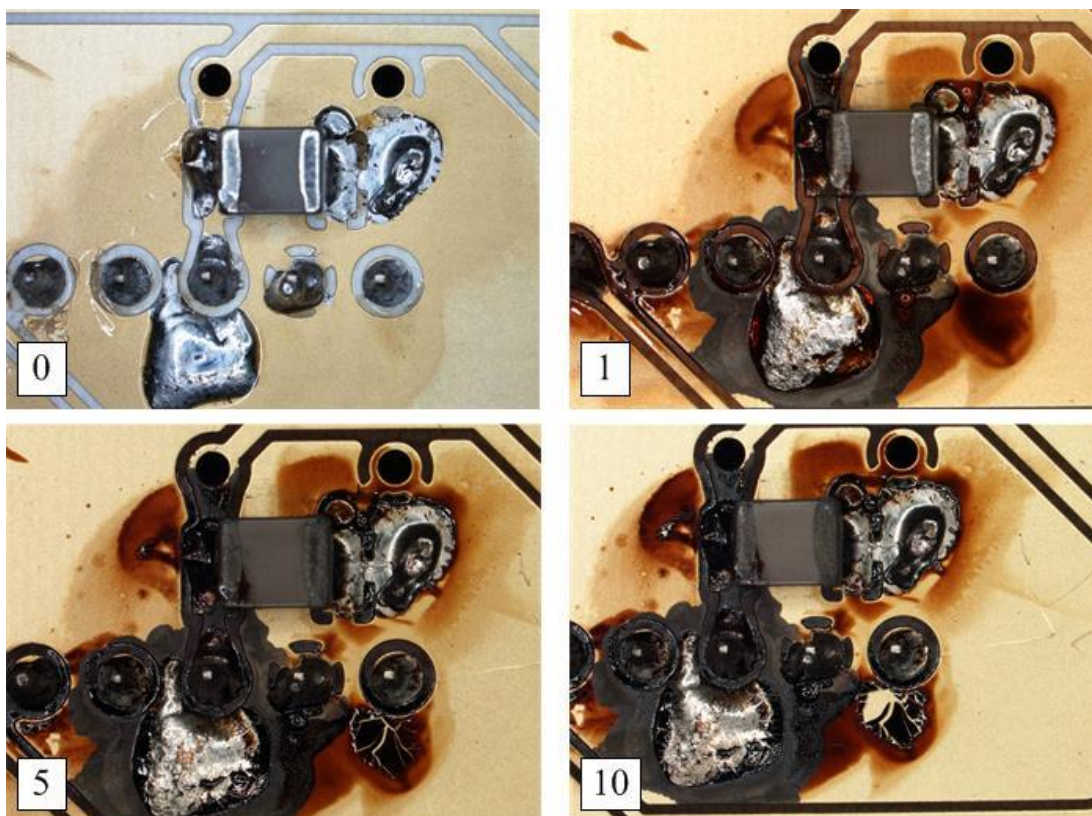


Kuva 35: Piirilevyn eristemateriaali tummui asteittain. Kuvan reunassa oleva numero kuvaa, kuinka monta 24 tunnin vanhennusta levyllä oli kuvanottohetkellä tehty.

Juoteliitoksia seurattiin mikroskoopin avulla. Kuvissa 36 ja 37 on esitetty kahden eri kohdan juoteliitoksien kehitystä vanhennuksien aikana. Juoteliitoksien pinnan värin havaittiin muuttuvan vanhennuksien edetessä hieman. Värin muutos voi johtua pinnan hapettumisesta tai juotemateriaalissa tapahtuneista faasimuutoksista. Juoteliitoksien muoto säilyi kaikkien vanhennuksien aikana muuttumattomana, eikä halkeamia tai säröjä havaittu. Juotettaessa haihtumatta jäänyt juoksute tummui ja lopulta lohkeili vanhennuksien edetessä. Juoksutetta oli jäänyt sekä jähmettyneen juotteen päälle, että valunut levyn pinnalle. Lopulta pahasti halkeilleet juoksutejäänteet irtosivat kokonaan. Alta paljastui muuttumaton piirilevyn pinta.

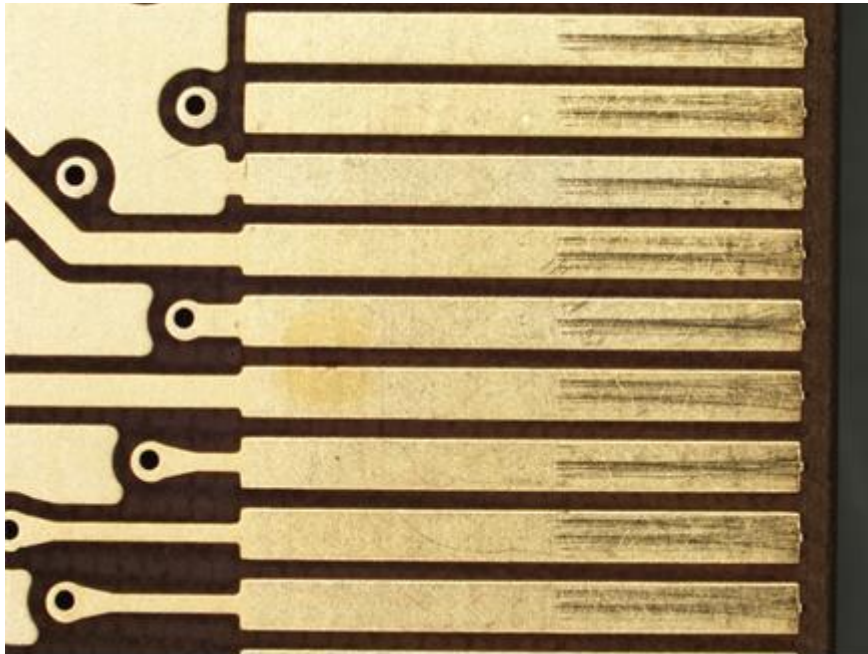


Kuva 36: Testikannan juoteliitosten kehitys vanhennuksien aikana. Kuvan reunassa oleva numero kuvaa, kuinka monta vanhennusta levyllä oli kuvanottohetkellä tehty.



Kuva 37: Suodatuskondensaattorin juoteliitosten kehitys vanhennuksien aikana. Kuvan reunassa oleva numero kuvaa, kuinka monta vanhennusta levyllä oli kuvanottohetkellä tehty.

Kortinreunaliittimen kontaktialueet joutuivat vanhennustestien aikana kovan mekaanisen rasituksen alaisiksi. Kortinreunaliitin piti irrottaa ja asettaa uudelleen kiinni levyyn uuniin asettamisen aikana, sillä liitin ei mahtunut uunin ovesa olevasta aukosta läpi. Kuvasta 38 nähdään hyvin, miten kortinreunaliittimen asettaminen ja poistaminen ovat kuluttaneet kontaktialueiden pinnoitetta. Pinnoitteessa näkyvät naarmut ovat kortinreunaliittimen jousikontaktien aiheuttamia. Resistanssimittausten perusteella naarmut eivät kuitenkaan aiheuttaneet piirilevyn ja kortinreunaliittimen välisen jousikontaktin huononemista.



Kuva 38: Kortinreunaliittimen kontaktialueet vanhennustestien jälkeen.

5.4 Työn tulosten arviointi

Tämän työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa poranterään asennettavalle kiihtyvyyssanturituotteelle sopiva testipiirilevy, jolla kyettäisiin testaamaan tuotetta 200 °C lämpötilassa. Tavoitteena oli myös koekäyttää suunniteltua piirilevyä loppusovelluksen kaltaisessa testissä. Testien perusteella valmis piirilevy osoittautui toimivaksi, joten työn tavoitteet voidaan katsoa saavutetuiksi.

Työn alussa testipiirilevylle asetettiin vaatimukseksi korkean lämpötilan kesto, kiihtyvyyssanturituotteen helppo asennettavuus ja vaihdettavuus sekä yhteensopivuus olemassa oleviin mittaaselektroniikkoihin. Tuotepaikkoja haluttiin sijoittaa levyille niin monta kuin mahdollista, ja lisäksi levyn toivottiin asettuvan uunin sisällä olevaan kiinnitystelineeseen.

Lämpötilan kesto määräytyi lähes suoraan löydettyjen materiaalien ominaisuuksista. Paljaan piirilevyn eristemateriaaliksi valittu keraami, sopivat korkean lämpötilan

kestävät testikannat, kortinreunaliitin, suodatuskondensaattorit ja juote mahdollistivat piirilevyn käytön 200 °C lämpötilassa. Kiihtyvyyssanturituotteiden helppo asennus otettiin huomioon valitsemalla tuotteiden kiinnitystavaksi testikanta piirilevyyn kiinni juottamisen sijaan. Kannan ansiosta tuotteet on helppo asentaa ja poistaa. Kortinreunaliitin valittiin yhteensopivaksi käytössä olevan mittauselektroniikan kanssa, mikä määritteli myös testipiirilevyn reitityksen kortinreunaliittimeltä eteenpäin. Reitityksen vuoksi levyille voitiin laittaa vain 12 kiihtyvyyssanturituotepaikkaa, kun kortinreunaliittimen ja tuotteen pinnimäärän perusteella paikkoja olisi voinut olla 20. Liitinvalinnan ansiosta testipiirilevy saatiin yhteensopivaksi yhden mittauselektroniikan kanssa. Valittu reititys tarjosi myös mahdollisuuden käyttää toista mittauselektroniikkaa testipiirilevyn kanssa, jos piirilevyn ja mittauselektroniikan välille suunniteltaisiin sopiva emokortti. Testiuuniin telineen suunnittelu tapahtui tämän työn teon kanssa samanaikaisesti, joten piirilevyn mitoituksessa voitiin ottaa huomioon telineen asettamat vaatimukset. Valmis testipiirilevy sopi suoraan uuniin rakennettuun telineeseen.

Testipiirilevyä kalustettaessa havaittiin, että juotteenestopinnoitteen puuttuminen paljaan piirilevyn pinnalta aiheutti ongelmia. Levy suunniteltiin huomioimatta sitä, että juotteenestopinnoitetta ei voitu käyttää testin vaatiman lämpötilan vuoksi. Ennen uuden erän tilaamista olisikin suositeltavaa palata paljaan piirilevyn suunnitelmaan, ja muokata sitä ottaen huomioon juotteenestopinnoitteen puuttuminen. Juotosalueiden eristeväliä maakaadosta tulisi kasvattaa, jolloin tahattomia oikosulkuja ei muodostuisi kalustuksessa yhtä helposti. Lisäksi maakaadot voitaisiin rajata niin, että pintaliitettävien suodatuskondensaattoreiden alle ei tulisi lainkaan kaatoa, jolloin huomaamattomien oikosulkujen riski pienenis.

Juotteenestopinnoitteen puuttuminen aiheutti myös silkkipainatuksen pois jäämisen. Kaikki levyn tunnistetiedot oli sijoitettu silkkipainatukseen, joten piirilevyyn ei jäänyt painatuksen puuttuessa mitään tunnistamista helpottavia merkintöjä. Paljaan piirilevyn pintakerroksessa oli paljon tyhjää maakaatoaluetta, johon tunnistetietoja voidaan jyrsiä levyn valmistusprosessin aikana. Silkkipainatuksessa olleet tunnistetiedot tulisi siis lisätä maakaatoon jyrsettäväksi piirilevyn tunnistamisen helpottamiseksi.

Edellä esitetyistä pienistä korjausehdotuksista huolimatta piirilevyn suunnittelun voidaan sanoa täyttäneen sille asetetut tavoitteet hyvin. Ainoa suunnitteluvaiheessa tapahtunut myönnitys oli tuotepaikkojen määrän pudotus maksimista. Testipiirilevyn yhteensopivuus mittauselektroniikkoihin oli kuitenkin huomattavasti tärkeämpää, kuin tuotepaikkojen määrän maksimointi. Kalustusvaiheessa havaitut puutteet olivat hyvin tyypillisiä ensimmäisessä erässä havaittavia vikoja, jotka on helppo korjata ennen seuraavan erän tilaamista.

Resistanssimittauksien avulla todettiin testipiirilevyn kestävän kymmenen 24 tunnin vanhennusta 200 °C lämpötilassa. Ennen testejä oletettiin, että valitulla vanhennuksien määrällä levyssä ei esiintyisi vikoja hyvin valittujen materiaalien ansiosta. Mittauksien tulokset vahvistivat tämän oletuksen oikeaksi. Mittauksilla ei saatu eroa jännitteisten ja

jännitteettömien linjojen välille, joten voidaan olettaa jännitteen kuluttavan vaikutuksen olleen pieni. Testien tavoitteena oli kokeilla valittujen piirilevymateriaalien ja komponenttien kestoa, ja voidaan sanoa testien onnistuneen tässä hyvin. Yrityksessä on ollut tapana vaihtaa kovassa käytössä olevat, uunissa vanhennustesteissä käytettävät piirilevyt usein. Työssä tehtyjen testien ansiosta saatiin tieto, kuinka monta vanhennustestiä testipiirilevy ainakin kestää. Piirilevyn varsinaista elinikää ei ollut tarkoitus määritellä, mutta mittausten perusteella voidaan sanoa, että testipiirilevy kestää ainakin kymmenen loppukäytön mukaista vanhennustestiä vikaantumatta.

Resistanssimittaukset myös omalta osaltaan osoittivat piirilevyn reitityksen onnistuneen hyvin, sillä samantyyppisten signaalireittien resistanssiarvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Tämä tarkoittaa, että reititys on kyetty sijoittamaan levyllä yhteneväisesti. Suurimmat resistanssiarvot mitattiin kauemman tuotepaikan SPI-väyliltä, ja ne olivat välillä $0,446 \Omega - 0,664 \Omega$. Vastaavasti pienimmät resistanssiarvot mitattiin maasignaaleista, ja ne olivat välillä $0,158 \Omega - 0,385 \Omega$.

Resistanssimittauksissa ei olisi huomattu, jos suodatuskondensaattoreiden juoteliitokset olisivat rikkoutuneet, sillä rinnankytketyn suodatuskondensaattorin liitokset eivät suoraan vaikuta signaalireitin resistanssiin. Juoteliitoksien käyttäytymistä seurattiin tämän takia myös visuaalisesti. Visuaalisen seurannan perusteella piirilevyssä ei havaittu vikoja vanhennustestien jälkeen, eli tulos oli samansuuntainen resistanssimittausten kanssa. Merkittävin havaittu muutos oli eristemateriaalin ja juoksutteen tummuminen, mikä ei vaikuttanut piirilevyn toimintaan.

Tässä työssä tehtyjen testien perusteella testipiirilevy voidaan ottaa yrityksessä tavanomaiseen käyttöön. Jatkossa piirilevyä tullaan vielä koekäyttämään pitkän ajan vanhennustestissä, sillä levyä voidaan mahdollisesti tarvita myös erityisen pitkiin vanhennuksiin. Seuraavaksi levyllä tehdäänkin 1000 tunnin mittainen vanhennustesti. Vanhennustestissä tullaan hyödyntämään tässä työssä käytettyjä uunia, yhteyskaapelia ja mittauselektroniikkaa, jolloin testiolosuhde on mahdollisimman samankaltainen jo tehtyjen 24 tunnin vanhennuksien kanssa. 1000 tunnin vanhennuksien jälkeen levyllä tullaan tekemään samanlaiset resistanssimittaukset kuin tässä työssä. Saatuja arvoja voidaan verrata edellä esitettyihin tuloksiin, jolloin on helppo nähdä, vaurioittiko erityisen pitkä vanhennus piirilevyä tässä työssä tehtyjä vanhennuksia enemmän.

Työn aikana kävi ilmi, että toissijaiseksi valittu mittauselektroniikka olisikin parempi vaihtoehto testipiirilevyn kanssa käytettäväksi. Ennen kuin testipiirilevy voidaan yhdistää toissijaiseen mittauselektroniikkaan, tulee niiden välille suunnitella sopiva emokortti. Emokortin valmistuttua voidaan sitä testata yhdessä tässä työssä suunnitellun testipiirilevyn kanssa. Tuleva emokortti mahdollistaa kahdeksan testipiirilevyn yhtäaikaisen käyttämisen uunissa, eli sen ansiosta voidaan testata yhtäaikaisesti yhteensä 96 kiihtyvyyssanturituotetta. Emokortin avulla testipiirilevyn suunnittelussa tehty myönnytys testattavien tuotepaikkojen määrästä saadaan siis kumottua.

6 Yhteenveto

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin korkean lämpötilan testipiirilevy porauksenai-
kaisessa mittaussovelluksessa käytettävää kiihtyvyyssanturituotetta varten. Työn tavoit-
teina oli valita sopivat, korkeaa lämpötilaa kestävät komponentit ja piirilevymateriaalit,
sekä suunnitella ja koota toimiva testipiirilevy. Tavoitteena oli myös testata valmista
piirilevyä loppukäyttöä simuloivalla lämpötilatestillä. Testipiirilevyn kyvykkyydelle
asetettiin kriteereiksi

- 200 °C lämpötilan kesto 24 tuntia kestävässä vanhennustestissä,
- kiihtyvyyssanturituotteen helppo asennus ja vaihto levyille,
- yhteensopivuus olemassa oleviin mittauselektroniikkoihin, sekä
- yhteensopivuus olemassa olevaan testiuuniin.

Valmis testipiirilevy täytti sille asetetut vaatimukset hyvin. Resistanssimittausten ja vi-
suaalisen seurannan avulla todettiin piirilevyn kestävän 200 °C lämpötilaa 24 tunnin
vanhennustestin ajan vikaantumatta. Valitun nollavoimakannan ansiosta kiihtyvyyssantu-
rituotteen asennus ja vaihto levyille saatiin vaivattomaksi. Valitsemalla käytössä olevan
mittauselektroniikan kanssa yhtenevä kortinreunaliitin ja reitittämällä signaalit vastaa-
vasti, saatiin testipiirilevystä suoraan yhteensopiva yhden mittauselektroniikan kanssa.
Seuraavaksi suunniteltavan emokortin avulla testipiirilevy on yhteensopiva myös toisen
mittauselektroniikan kanssa. Piirilevyn ulkomitat valittiin niin, että se sekä tuleva emo-
kortti ovat suoraan sopivia testiuunissa olevaan telineeseen. Tämän työn tärkeimpänä
tuloksena voidaan pitää toimivan testipiirilevyn toteutusta.

Testipiirilevyn suunnittelun onnistuminen pohjautui suurimmalta osalta onnistuneisiin
materiaalivalintoihin. Materiaalien ominaisuuksia, kuten lasitransformaatiolämpötilaa ja
homologista lämpötilaa tutkimalla voitiin karkeasti ennustaa, kuinka ne käyttäytyvät eri
lämpötiloissa. Paljaassa piirilevyssä, testikannassa ja kortinreunaliittimessä käytetyt
eristemateriaalit valittiin siten, että niiden lasitransformaatiolämpötilat olivat tarpeeksi
korkeita 200 °C käyttölämpötilaa ajatellen. Testikannan ja kortinreunaliittimen johde-
materiaalit edustivat metalliseoksia, jotka oli todettu erityisen hyvin korkeassa lämpöti-
lassa käyttäytyviksi. Liitosten tekemiseen käytetty juoteseos valittiin ensisijaisesti kor-
tinreunaliittimen suosituksen mukaisesti. Seosmateriaalien yhteensopivuuden lisäksi oli
tärkeää, että juotemateriaali oli myötävä mahdollisten lämpötilavaihteluiden aiheutta-
mien sisäisten jännitysten neutraloimiseksi. Homologisen lämpötilan perusteella valittu
juoteseos oli 200 °C käyttölämpötilassa altis virumiselle. Lievä juotteen viruminen mah-
dollisti liitosten sisäisten jännitysten laukeamisen pitäen silti liitokset paikoillaan.

Piirilevyyen jääneet suunnitteluvirheet havaitaan useimmiten vasta silloin, kun levy ote-
taan käyttöön. Työssä tehtyjen testien ansiosta testipiirilevyä koekäytettiin ilman aika-
taulupaineita. Piirilevyssä havaitut puutteet, eli tunnistetietojen pois jääminen ja liian
pieni eristeväli, ehditään korjata tekemällä paljaasta piirilevystä uusi versio ennen sen

varsinaista käyttöönottoa. Varsinkin eristevälin suurentaminen kasvattaa piirilevyn käytettävyyttä, kun kalustuksen aiheuttamien oikosulkujen riski pienenee. Toisaalta myös tunnistetiedot ovat tärkeä osa piirilevyn käytön sujuvuutta, sillä ilman niitä levyä on huomattavasti vaikeampi tunnistaa muista samankaltaisista piirilevyistä. Tunnistetiedot ovat erityisen tärkeitä silloin, kun piirilevyä käyttää henkilö, jolle levy ei ole ennestään tuttu.

Vanhennustestit ja resistanssimittaukset osoittivat testipiirilevyn kestävän ainakin kymmenen 24 tunnin mittaista vanhennusta. Vaikka levy ja juoksutejäänteet tummuivat vanhennuksien edetessä huomattavasti, resistanssimittausten ja visuaalisen seurannan avulla piirilevy todettiin edelleen toimivaksi. Tulos on tärkeä, sillä aiempien testipiirilevyjen kohdalla levyt on päätetty vaihtaa varmuuden vuoksi jo paljon aiemmin. Tehtyjen vanhennustestien ansioksi voidaan myös lukea toimiva testilaitteisto. Laitteiston avulla voidaan suorittaa testipiirilevylle seuraavaksi suunniteltu 1000 tunnin vanhennustesti.

Lähdeluettelo

- [1] Murata Electronics Oy, <http://www.murataMEMS.fi>. [Online]. [Haettu 16. Toukokuu 2014].
- [2] Murata Electronics Oy, ”SCA8X0, 21X0, 3100 Product Family Specification,” <http://www.murata.com/en-global/products/sensor/accel/sca3100>. [Online]. [Haettu 30. Tammikuu 2015].
- [3] Princeton University Soboyejo Research Group, ”MEMS/Nanoscale Thin Films,” http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research_group/research/mems. [Online]. [Haettu 30. Toukokuu 2014].
- [4] M. Jiménez, R. Palomera ja I. Couvertier, *Introduction to Embedded Systems*, Springer New York, 2014.
- [5] X. Qilong, W. Ruihe, S. Feng, H. Leilei ja H. Laiju, ”Continuous Measurement-While-Drilling Utilizing Strap-Down Multi-Model Surveying System,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, osa/vuosik. 63, nro 3, pp. 650-657, 2014.
- [6] Z. Wang, M. Poscente, D. Filip, M. Dimanchev ja M. P. Mintchev, ”Rotary In-Drilling Alignment using an Autonomous MEMS-Based Inertial Measurement Unit for Measurement-While-Drilling Processes,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, osa/vuosik. 16, nro 6, pp. 26-34, 2013.
- [7] I. Fridleifsson, R. Bertani, E. Huenges, J. W. Lund, A. Ragnarsson ja L. Rybach, ”The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change,” tekijä: *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*, Lübeck, 2008.
- [8] D. Crowe ja A. Feinberg, *Design for Reliability*, CRC Press LLC, 2001.
- [9] K. C. Kapur ja M. Pecht, *Reliability Engineering*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.
- [10] W. Kuo ja Y. Kuo, ”Facing the Headaches of Early Failures: A State-of-the-Art Review of Burn-In Decisions,” *Proceedings of the IEEE*, osa/vuosik. 71, nro 11, pp. 1257-1266, 1983.
- [11] JEDEC Standard No. 22-A104D, *Temperature Cycling*, 2009.
- [12] JEDEC Standard No. 22-A106B, *Thermal Shock*, 2011.
- [13] JEDEC Standard No. 22-A122, *Power Cycling*, 2007.
- [14] JEDEC Standard No. 22-B110B, *Mechanical Shock - Component and Subassembly*, 2013.
- [15] R. R. Tummala, *Fundamentals of Microsystems Packaging*, McGraw-Hill Publishing, 2000.
- [16] MIL-STD-883J, *Method 1015.10 Burn-In Test*, 2010.
- [17] JEDEC Standard No. 22-A108D, *Temperature, Bias, and Operating Life*, 2010.

- [18] H. W. Block ja T. H. Savits, "Burn-In," *Statistical Science*, osa/vuosik. 12, nro 1, pp. 1-13, 1997.
- [19] J. F. Shackelford, *Introduction to Materials Science for Engineers*, Pearson Education International, 2009.
- [20] L. Z. Bo, N. Kamsah, L. W. Keat ja M. N. Tamin, "Mechanics of Sn-4Ag-0.5Cu Solder Joints in a Ball Grid Array Assembly during Reflow and Temperature Cycles," tekijä: *33rd IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, Penang, 2008.
- [21] P. Lall, V. Yadav, D. Zhang, J. Suhling ja S. Shantaram, "High Strain Rate Mechanical Properties of SAC105 Leadfree Alloy at High Operating Temperatures," tekijä: *IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Orlando, FL, 2014.
- [22] E. P. De Garmo, J. Black ja R. A. Kohser, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*, John Wiley & Sons, 2011.
- [23] R. Sanapala, B. Sood, D. Das ja M. Pecht, "Effect of Lead-Free Soldering on Key Material Properties of FR-4 Printed Circuit Board Laminates," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, osa/vuosik. 32, nro 4, pp. 272-280, 2009.
- [24] Isola, "DE104 Data Sheet," <http://www.isola-group.com/products/de104/>. [Online]. [Haettu 30. Kesäkuu 2014].
- [25] R. R. Tummala, E. J. Rymaszewski ja A. G. Klopfenstein, *Microelectronics Packaging Handbook: Subsystem Packaging*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [26] Isola, "P95 Data Sheet," <http://www.isola-group.com/products/p95/>. [Online]. [Haettu 30. Kesäkuu 2014].
- [27] H. Qi, J. Wu, M. Pecht, P. Matkowski ja J. Felba, "Effects of Printed Circuit Board Materials on Lead-free Interconnect Durability," tekijä: *5th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics*, Warsaw, 2005.
- [28] Rogers Corporation, "RO4000 Series High Frequency Circuit Materials Data Sheet," <http://www.rogerscorp.com/acm/products/55/RO4350B-Laminates.aspx>. [Online]. [Haettu 30. Kesäkuu 2014].
- [29] J. Coonrod, "High-Frequency Circuit Materials Can Enhance Non-High-Frequency Applications," *The PCB Magazine*, pp. 66-69, Huhtikuu 2013.
- [30] Multi-Cb, "High-Tg circuit boards," <http://www.multi-circuit-boards.eu/en/products/printed-circuit-boards/special-production/high-tg-pcb.html>. [Online]. [Haettu 23. Huhtikuu 2014].
- [31] P. Lall, V. Narayan, J. Suhling, J. Blanche ja M. Strickland, "Effect of Reflow Process in Glass Transition Temperature of Printed Circuit Board Laminates," tekijä: *13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, San Diego, CA, 2012.

- [32] H.-G. Lee ja K.-W. Paik, "Effects of Curing Agent and Curing Temperature on Material Properties of Epoxy/BaTiO₃ Composite Embedded Capacitor Films," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, osa/vuosik. 5, nro 4, pp. 451-459, 2015.
- [33] K. Suganuma, S.-J. Kim ja K.-S. Kim, "High-temperature lead-free solders: Properties and possibilities," *JOM*, osa/vuosik. 61, nro 1, pp. 64-71, 2009.
- [34] V. Chidambaram, J. Hattel ja J. Hald, "High-temperature lead-free solder alternatives," *Microelectronic Engineering*, osa/vuosik. 88, nro 6, pp. 981-989, 2011.
- [35] D. R. Frear, "Issues related to the implementation of Pb-free electronic solders in consumer electronics," *Lead-Free Electronic Solders - A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, pp. 319-330, 2007.
- [36] A. Kroupa, D. Andersson, N. Hoo, J. Pearce, A. Watson, A. Dinsdale ja S. Mucklejohn, "Current Problems and Possible Solutions in High-Temperature Lead-Free Soldering," *Journal of Materials Engineering and Performance*, osa/vuosik. 21, nro 5, pp. 629-637, 2012.
- [37] P. Viswanadham ja P. Singh, *Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages*, Chapman & Hall, 1998.
- [38] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens ja H. O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*, Wiley-Interscience, 2000.
- [39] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann ja R. De Doncker, *Semiconductor Power Devices*, Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [40] Sullins Corp. , "Critical Instructions for Spinodal Soldering," www.sullinscorp.com/tech-center/Critical-Instructions-for-Spinodal-Soldering.pdf. [Online]. [Haettu 23. Lokakuu 2014].
- [41] M.-J. Pan ja C. A. Randall, "A Brief Introduction to Ceramic Capacitors," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, osa/vuosik. 26, nro 3, pp. 44-50, 2010.
- [42] T. Kobayashi, H. Ariyoshi ja A. Masuda, "Reliability Evaluation and Failure Analysis for Multilayer Ceramic Chip Capacitors," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, osa/vuosik. 1, nro 3, pp. 316-324, 1978.
- [43] F. Yeung ja Y. Chan, "Electrical Failure of Multilayer Ceramic Capacitors Caused by High Temperature and High Humidity Environment," tekijä: *Proceedings of the 44th Electronic Components and Technology Conference*, Washington, DC, 1994.
- [44] D. Parker, J. Bussink, H. T. van de Grampel, G. W. Wheatley, E.-U. Dorf, E. Ostlinning, K. Reinking, F. Schubert, O. Jünger ja R. Wagener, "Polymers, High-Temperature," tekijä: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2012.
- [45] T. W. Giants, "Crystallinity and Dielectric Properties of PEEK, Poly(ether ether ketone)," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 991-999, 1994.

- [46] R. Diehl, "The Ductility Reversal During Age Hardening of Beryllium Nickel Contact Spring Material," *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, osa/vuosik. 10, nro 1, pp. 48-52, 1974.
- [47] F. Findik, "Improvements in spinodal alloys from past to present," *Materials & Design*, osa/vuosik. 42, pp. 131-146, 2012.
- [48] W. R. Cribb, "Copper Spinodal Alloys," *Advanced Materials & Processes*, osa/vuosik. 160, nro 11, pp. 27-30, 2002.
- [49] Z. Hui, H. Yizhu, Y. Xiaomin ja P. Ye, "Microstructure and age characterization of Cu-15Ni-8Sn alloy coatings by laser cladding," *Applied Surface Science*, osa/vuosik. 256, nro 20, pp. 5837-5842, 2010.
- [50] J.-C. Zhao ja M. Notis, "Spinodal decomposition, ordering transformation, and discontinuous precipitation in a Cu-15Ni-8Sn alloy," *Acta Materialia*, osa/vuosik. 46, nro 12, pp. 4203-4218, 1998.
- [51] Sullins Corp., "ACB100DHHD Data Sheet," http://www.sullinscorp.com/drawings/45_HH_C10711.pdf. [Online]. [Haettu 5. Maaliskuu 2015].
- [52] Sullins Corp., "FMB100DYHD Data Sheet," www.sullinscorp.com/drawings/445_B_DYH_C11419.pdf. [Online]. [Haettu 23. Lokakuu 2014].
- [53] Sullins Corp., "WMC65DRYH Data Sheet," http://www.sullinscorp.com/drawings/244___C__DRY__,_C10879-A.pdf. [Online]. [Haettu 5. Maaliskuu 2015].
- [54] Aries Electronics, Inc., "Series X55X High-Temperature Universal ZIF DIP Test Socket Data Sheet," www.arieselec.com/products/data/10002-high-temp-universal-dip-zif-test-socket.pdf. [Online]. [Haettu 23. Lokakuu 2014].
- [55] Kemet, "High Temperature Surface Mount C0G Multilayer Ceramic Capacitors Data Sheet," http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/218/KEM_C1001_C0G_200C_SMD.pdf. [Online]. [Haettu 24. Lokakuu 2014].
- [56] Kemet, "High Temperature Radial Molded C0G Dielectric Multilayer Ceramic Capacitor Data Sheet," http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/550/KEM_C1073_HT_RADIAL_MOLDED_C0G.pdf. [Online]. [Haettu 24. Lokakuu 2014].
- [57] Aspocomp, "Wiring Density of Thick HDI," <http://www.aspocomp.com/products-and-services/capability/wiring-density-thick-hdi>. [Online]. [Haettu 4. Joulukuu 2014].
- [58] ME PCB AB, "Capability," <http://www.mepcb.se/en/capability.html>. [Online]. [Haettu 4. Joulukuu 2014].
- [59] Rogers Corporation, "RO4400 Series Bondply Data Sheet," <http://www.rogerscorp.com/acm/products/57/RO4450B-Prepregs-Bondply.aspx>. [Online]. [Haettu 2. Helmikuu 2015].

- [60] Vishay Dale, "RS, NS product information," <http://www.vishay.com/product?docid=30204>. [Online]. [Haettu 26. Helmikuu 2015].

Liite A: Testipiirilevyn piirikaavio

Ltr.	Qty	Change	Reason / ECD no	Design	Date Review	Date Appr

Note!
One socket contains two DUTs, A and B! A is always assembled above B.

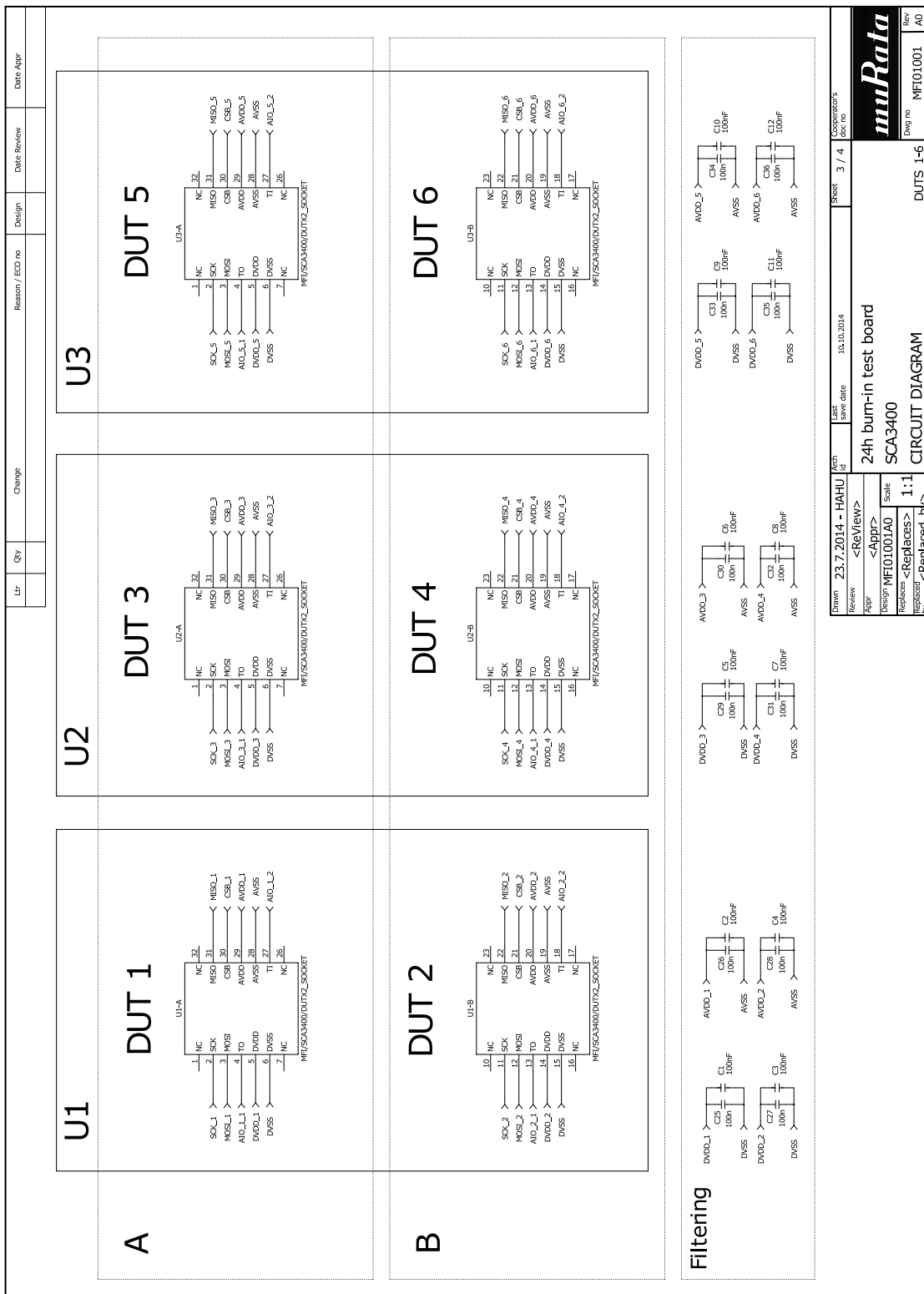
Drawn	23.7.2014 - HAHU	Part id		Last save date	10.10.2014	Sheet	1 / 4	Component's doc no	
Review	<Review>	Appr	<Appr>	24h buim-in test board				mulRata	
Design	MFI01001A0	Scale		SCA3400				Dwg no	MFI01001
Replaces	<Replaces>	Scale	1:1	CIRCUIT DIAGRAM				Rev	AO
Replaces by	<Replaced_by>			INFO					

Kuva 39: Testipiirilevyn piirikaavion kansilehti.

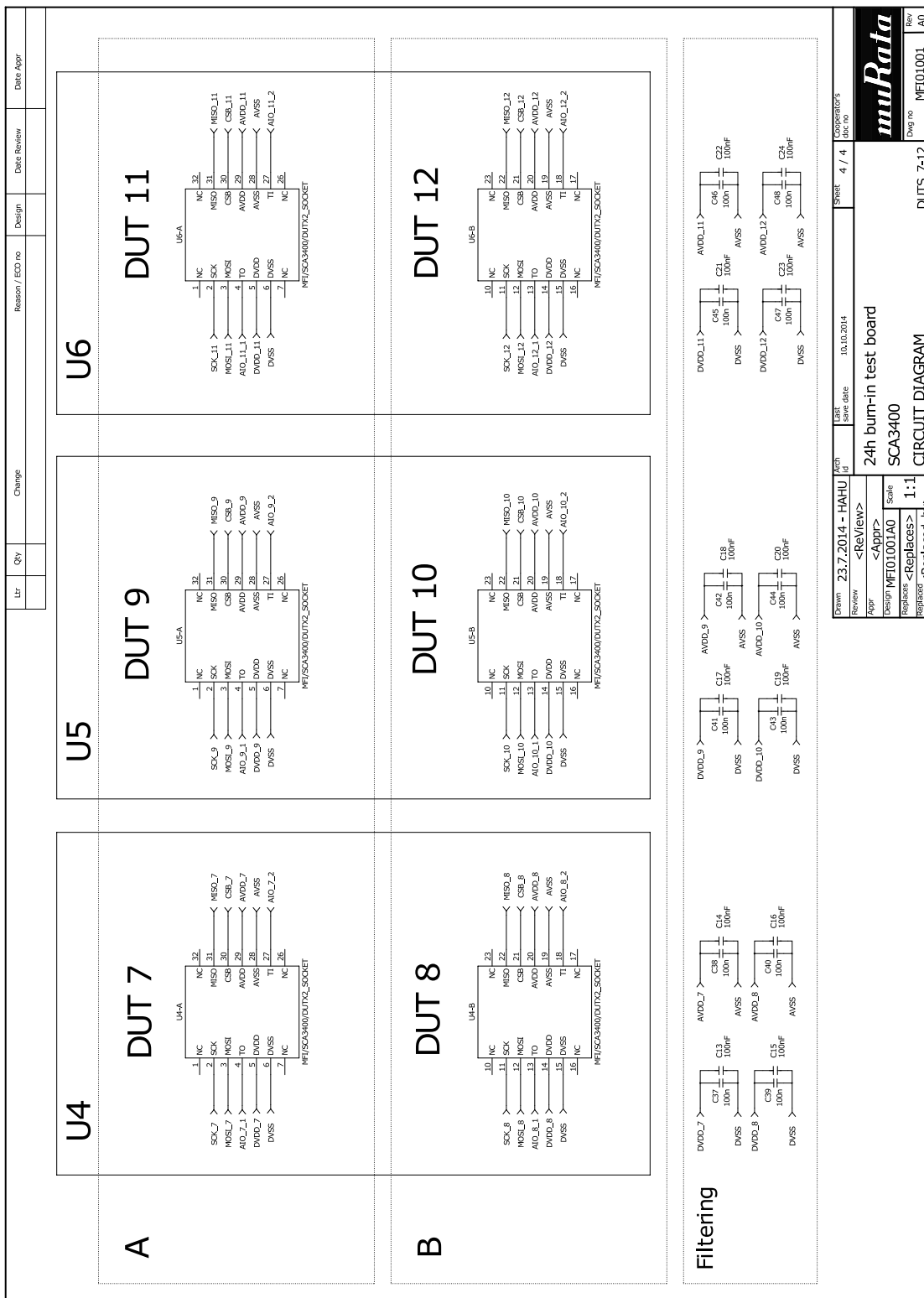
LT	Qty	Change	Reason / ECO no	Design	Date Review	Date Appr
J1-1	>		CSL,7			
J1-2	>		MOSL,7			
J1-3	>		SKK,7			
J1-4	>		MISO,7			
J1-5	>		SKK,7			
J1-6	>		AVDD,7,4			
J1-7	>		AVDD,7,3			
J1-8	>		AVDD,7,2			
J1-9	>		AVDD,7,1			
J1-10	>		AVDD,6,2			
J1-11	>		AVDD,6,3			
J1-12	>		AVDD,6,4			
J1-13	>		AVDD,6			
J1-14	>		AVDD,5,8			
J1-15	>		AVDD,5,7			
J1-16	>		AVDD,5,8			
J1-17	>		CSL,5			
J1-18	>		MOSL,5			
J1-19	>		MISO,5			
J1-20	>		SKK,5			
J1-21	>		AVDD,5,4			
J1-22	>		AVDD,5,3			
J1-23	>		AVDD,5,2			
J1-24	>		AVDD,5,1			
J1-25	>		AVDD,5,1			
J1-26	>		AVDD,5,2			
J1-27	>		AVDD,5,3			
J1-28	>		AVDD,5,4			
J1-29	>		AVDD,5,4			
J1-30	>		AVDD,5,5			
J1-31	>		AVDD,5,6			
J1-32	>		AVDD,5,6			
J1-33	>		CSL,9			
J1-34	>		MOSL,9			
J1-35	>		MISO,9			
J1-36	>		SKK,9			
J1-37	>		AVDD,9,4			
J1-38	>		AVDD,9,3			
J1-39	>		AVDD,9,2			
J1-40	>		AVDD,9,1			
J1-41	>		AVDD,10,1			
J1-42	>		AVDD,10,2			
J1-43	>		AVDD,10,3			
J1-44	>		AVDD,10,4			
J1-45	>		AVDD,10			
J1-46	>		AVDD,10			
J1-47	>		AVDD			
J1-48	>		AVDD,10			
J1-49	>		CSL,3			
J1-50	>		MOSL,3			
J1-51	>		MISO,3			
J1-52	>		SKK,3			
J1-53	>		AVDD,10,4			
J1-54	>		AVDD,10,3			
J1-55	>		AVDD,10,2			
J1-56	>		AVDD,10,1			
J1-57	>		AVDD,9			
J1-58	>		AVDD,9			
J1-59	>		AVDD,9			
J1-60	>		AVDD,9			
J1-61	>		AVDD,9			
J1-62	>		AVDD,9			
J1-63	>		AVDD,9			
J1-64	>		AVDD,9			
J1-65	>		AVDD,9			
J1-66	>		AVDD,9			
J1-67	>		AVDD,9			
J1-68	>		AVDD,9			
J1-69	>		AVDD,9			
J1-70	>		AVDD,9			
J1-71	>		AVDD,9			
J1-72	>		AVDD,9			
J1-73	>		AVDD,9			
J1-74	>		AVDD,9			
J1-75	>		AVDD,9			
J1-76	>		AVDD,9			
J1-77	>		AVDD,9			
J1-78	>		AVDD,9			
J1-79	>		AVDD,9			
J1-80	>		AVDD,9			
J1-81	>		AVDD,9			
J1-82	>		AVDD,9			
J1-83	>		AVDD,9			
J1-84	>		AVDD,9			
J1-85	>		AVDD,9			
J1-86	>		AVDD,9			
J1-87	>		AVDD,9			
J1-88	>		AVDD,9			
J1-89	>		AVDD,9			
J1-90	>		AVDD,9			
J1-91	>		AVDD,9			
J1-92	>		AVDD,9			
J1-93	>		AVDD,9			
J1-94	>		AVDD,9			
J1-95	>		AVDD,9			
J1-96	>		AVDD,9			
J1-97	>		AVDD,9			
J1-98	>		AVDD,9			
J1-99	>		AVDD,9			
J1-100	>		AVDD,9			
J1-101	>		AVDD,9			
J1-102	>		AVDD,9			
J1-103	>		AVDD,9			
J1-104	>		AVDD,9			
J1-105	>		AVDD,9			
J1-106	>		AVDD,9			
J1-107	>		AVDD,9			
J1-108	>		AVDD,9			
J1-109	>		AVDD,9			
J1-110	>		AVDD,9			
J1-111	>		AVDD,9			
J1-112	>		AVDD,9			
J1-113	>		AVDD,9			
J1-114	>		AVDD,9			
J1-115	>		AVDD,9			
J1-116	>		AVDD,9			
J1-117	>		AVDD,9			
J1-118	>		AVDD,9			
J1-119	>		AVDD,9			
J1-120	>		AVDD,9			
J1-121	>		AVDD,9			
J1-122	>		AVDD,9			
J1-123	>		AVDD,9			
J1-124	>		AVDD,9			
J1-125	>		AVDD,9			
J1-126	>		AVDD,9			
J1-127	>		AVDD,9			
J1-128	>		AVDD,9			
J1-129	>		AVDD,9			
J1-130	>		AVDD,9			
J1-131	>		AVDD,9			
J1-132	>		AVDD,9			
J1-133	>		AVDD,9			
J1-134	>		AVDD,9			
J1-135	>		AVDD,9			
J1-136	>		AVDD,9			
J1-137	>		AVDD,9			
J1-138	>		AVDD,9			
J1-139	>		AVDD,9			
J1-140	>		AVDD,9			
J1-141	>		AVDD,9			
J1-142	>		AVDD,9			
J1-143	>		AVDD,9			
J1-144	>		AVDD,9			
J1-145	>		AVDD,9			
J1-146	>		AVDD,9			
J1-147	>		AVDD,9			
J1-148	>		AVDD,9			
J1-149	>		AVDD,9			
J1-150	>		AVDD,9			
J1-151	>		AVDD,9			
J1-152	>		AVDD,9			
J1-153	>		AVDD,9			
J1-154	>		AVDD,9			
J1-155	>		AVDD,9			
J1-156	>		AVDD,9			
J1-157	>		AVDD,9			
J1-158	>		AVDD,9			
J1-159	>		AVDD,9			
J1-160	>		AVDD,9			
J1-161	>		AVDD,9			
J1-162	>		AVDD,9			
J1-163	>		AVDD,9			
J1-164	>		AVDD,9			
J1-165	>		AVDD,9			
J1-166	>		AVDD,9			
J1-167	>		AVDD,9			
J1-168	>		AVDD,9			
J1-169	>		AVDD,9			
J1-170	>		AVDD,9			
J1-171	>		AVDD,9			
J1-172	>		AVDD,9			
J1-173	>		AVDD,9			
J1-174	>		AVDD,9			
J1-175	>		AVDD,9			
J1-176	>		AVDD,9			
J1-177	>		AVDD,9			
J1-178	>		AVDD,9			
J1-179	>		AVDD,9			
J1-180	>		AVDD,9			
J1-181	>		AVDD,9			
J1-182	>		AVDD,9			
J1-183	>		AVDD,9			
J1-184	>		AVDD,9			
J1-185	>		AVDD,9			
J1-186	>		AVDD,9			
J1-187	>		AVDD,9			
J1-188	>		AVDD,9			
J1-189	>		AVDD,9			
J1-190	>		AVDD,9			
J1-191	>		AVDD,9			
J1-192	>		AVDD,9			
J1-193	>		AVDD,9			
J1-194	>		AVDD,9			
J1-195	>		AVDD,9			
J1-196	>		AVDD,9			
J1-197	>		AVDD,9			
J1-198	>		AVDD,9			
J1-199	>		AVDD,9			
J1-200	>		AVDD,9			

Kuva 40: Testipiirilevyn piirikaavion sivu, jolla on esitetty kortinreunaliittimen J1 kyt-kennät.

Drawn	23.7.2014 - HAHU	LAST save date	10.10.2014	Sheet	2 / 4	Component's Ref No	
Appr	<Review>	Design	MF101001A0	24h burn-in test board		Company's Ref No	MF101001
Replaces	<Replaces>	Scale	1:1	CIRCUIT DIAGRAM		Rev	AO
By	<Replaced by>						

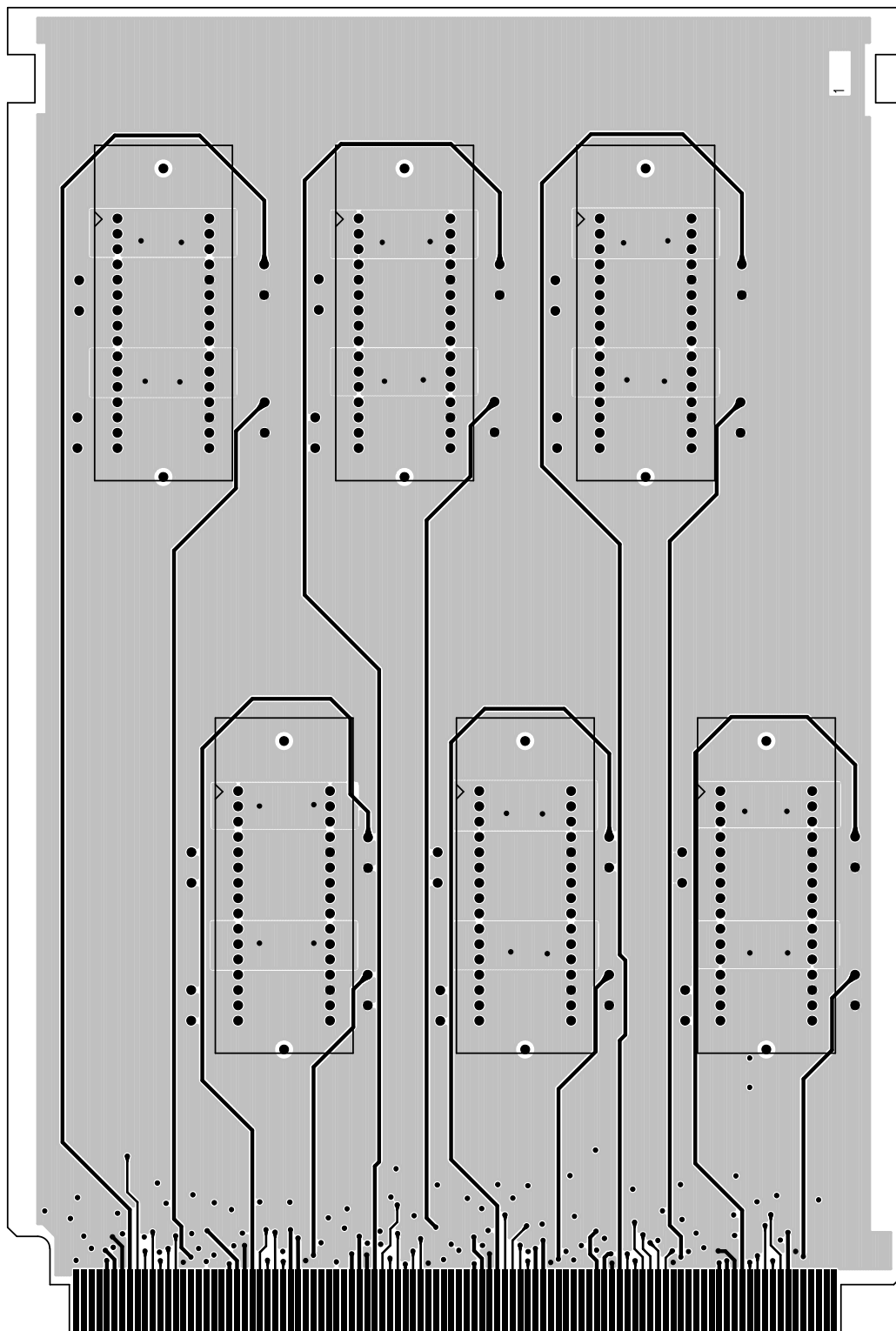


Kuva 41: Testipiirilevyn piirikaavion sivu, jolla on esitetty tuotepaikkojen 1-6 kytkennät.

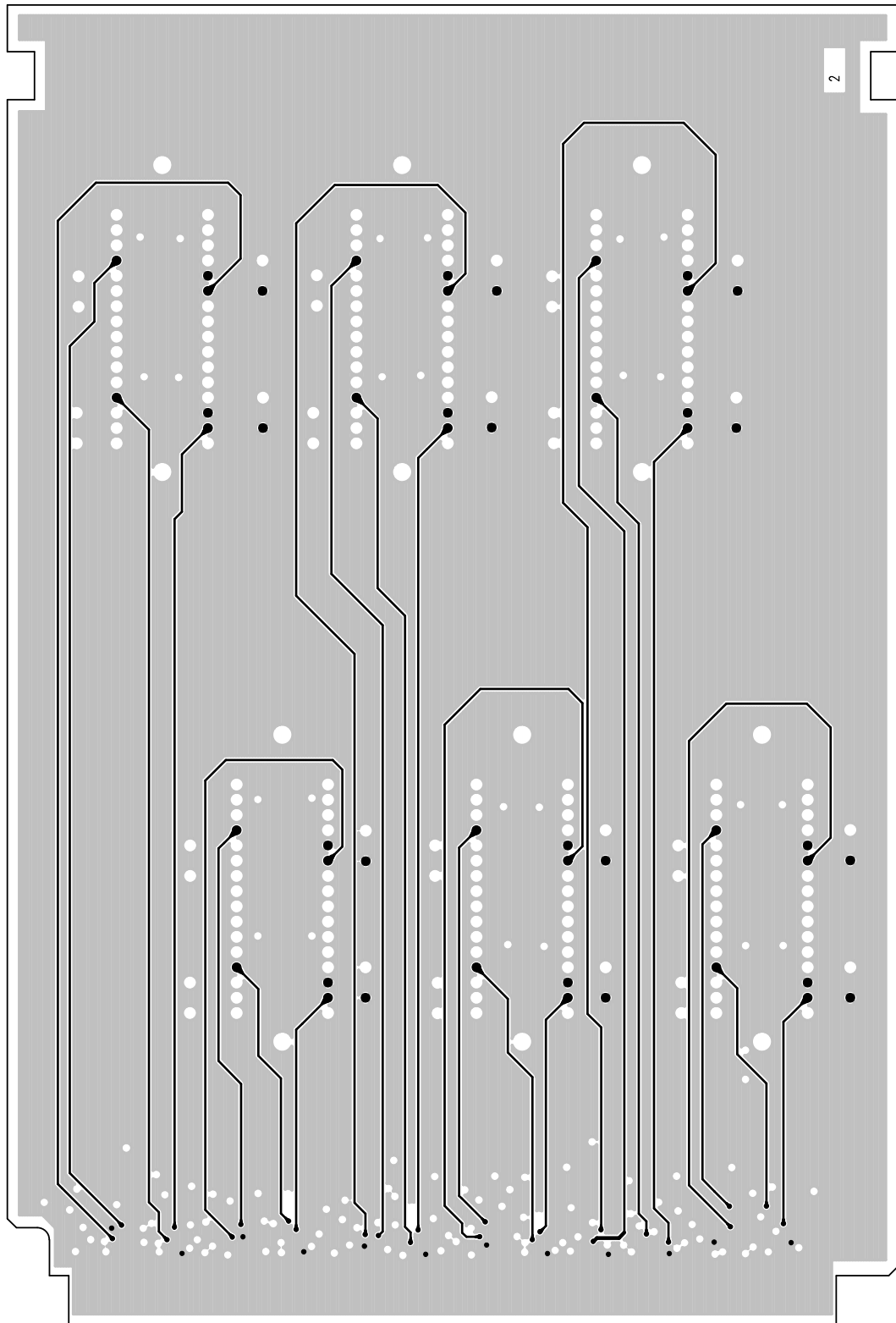


Kuva 42: Testipiirilevyn piirikaavion sivu, jolla on esitetty tuotepaikkojen 7-12 kytkennät.

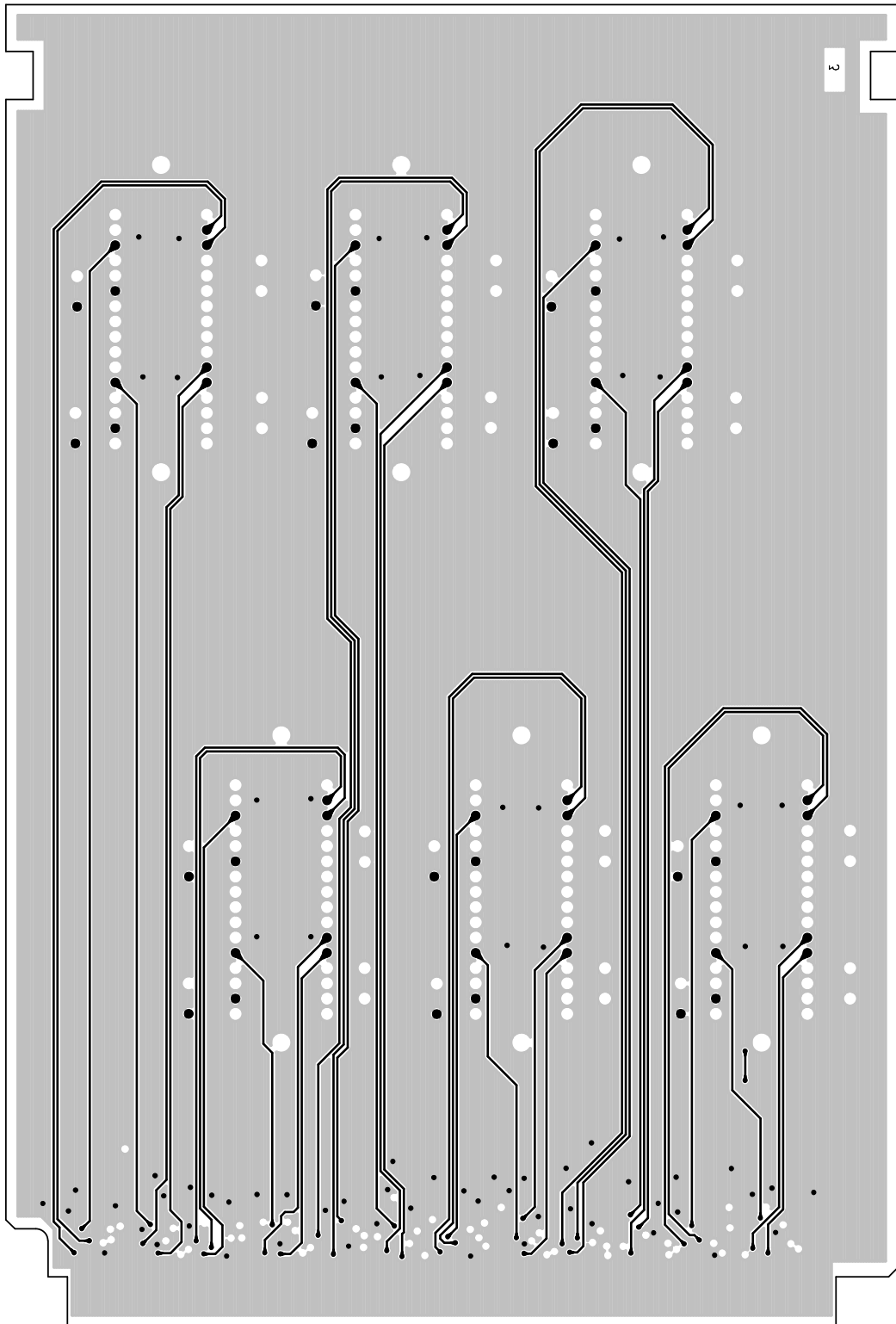
Liite B: Testipiirilevyn reititys



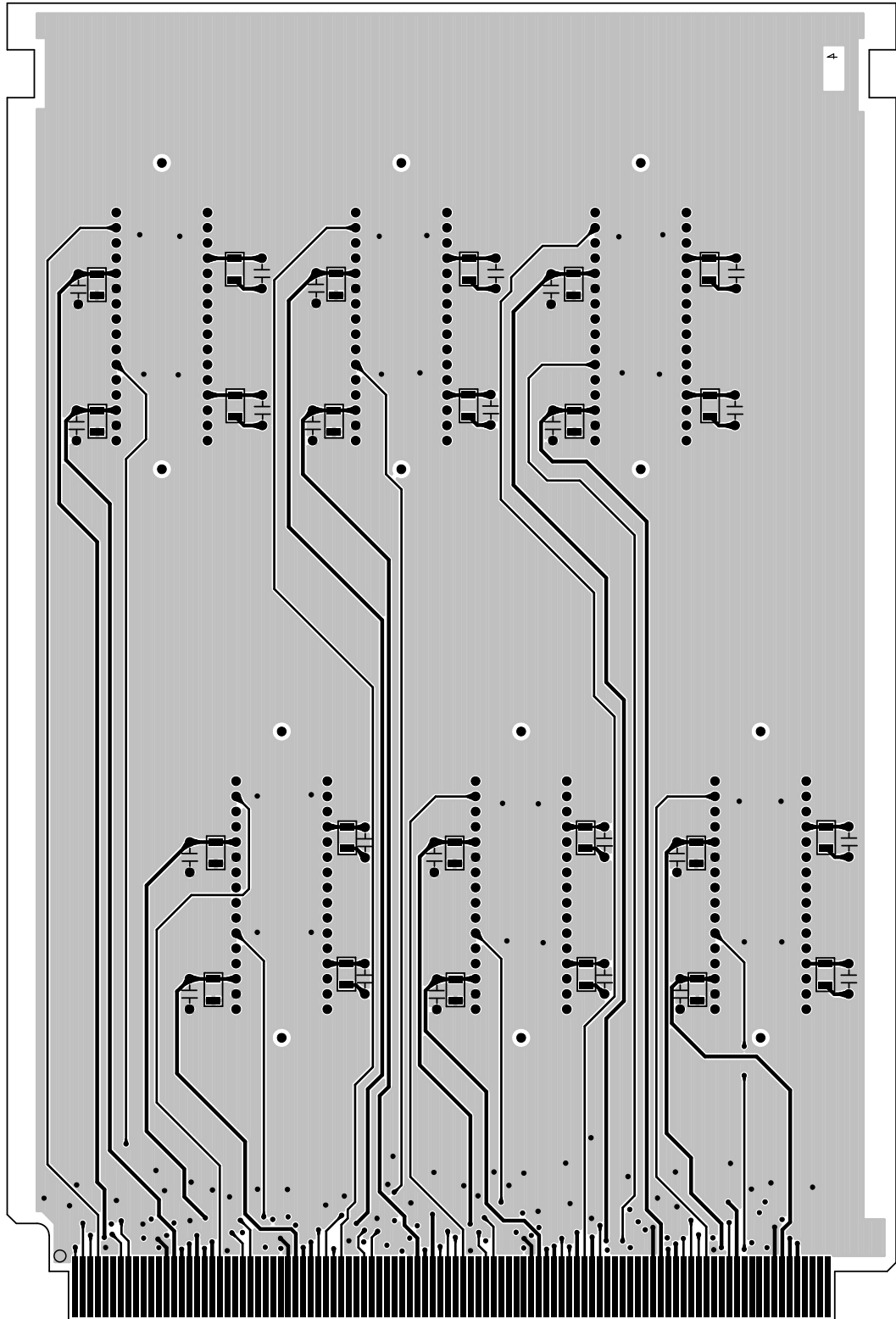
Kuva 43: Testipiirilevyn 1. signaalikerros. Harmaalla väritetty alue on kuparikaatoa, mustat alueet ovat joko signaalivetoja, reikiä, komponenttien juotosalueita tai ääri viivoja.



Kuva 44: Testipiirilevyn 2. signaaliokerros.

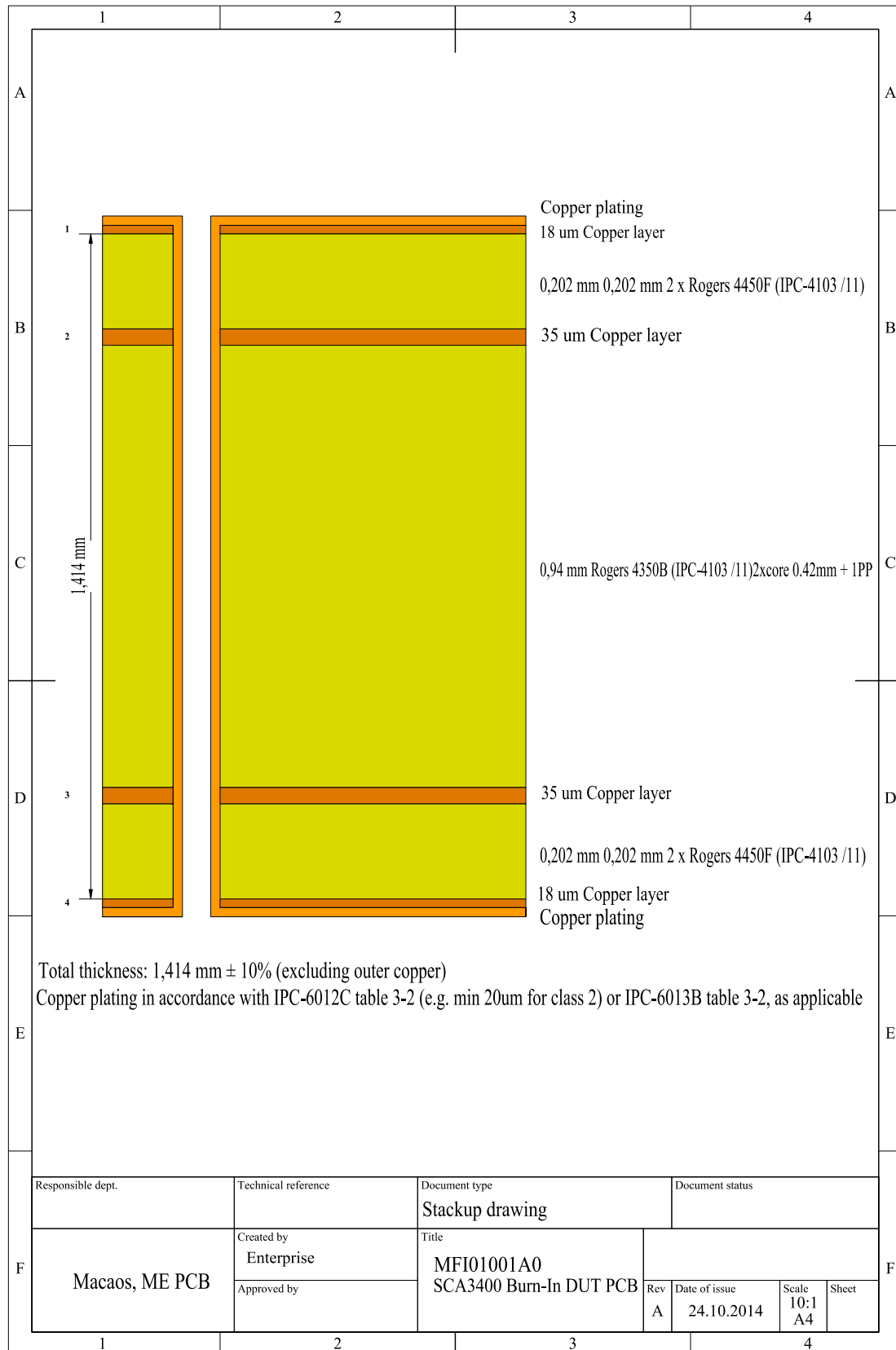


Kuva 45: Testipiirilevyn 3. signaalikerros.



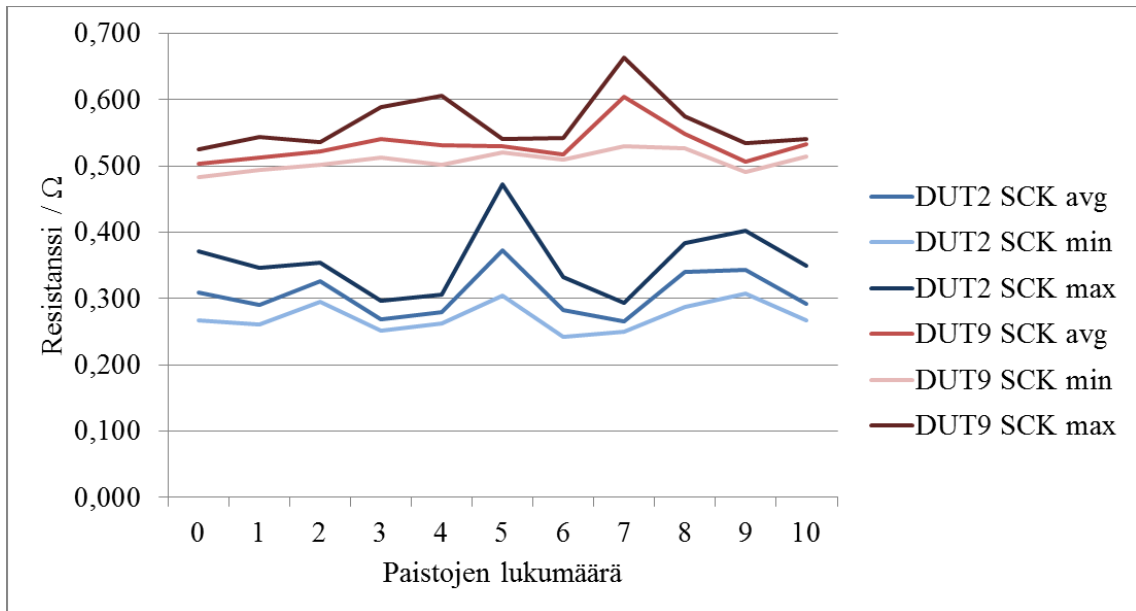
Kuva 46: Testipiirilevyn 4. signaalikerros.

Liite C: Testipiirilevyn poikkileikkaus

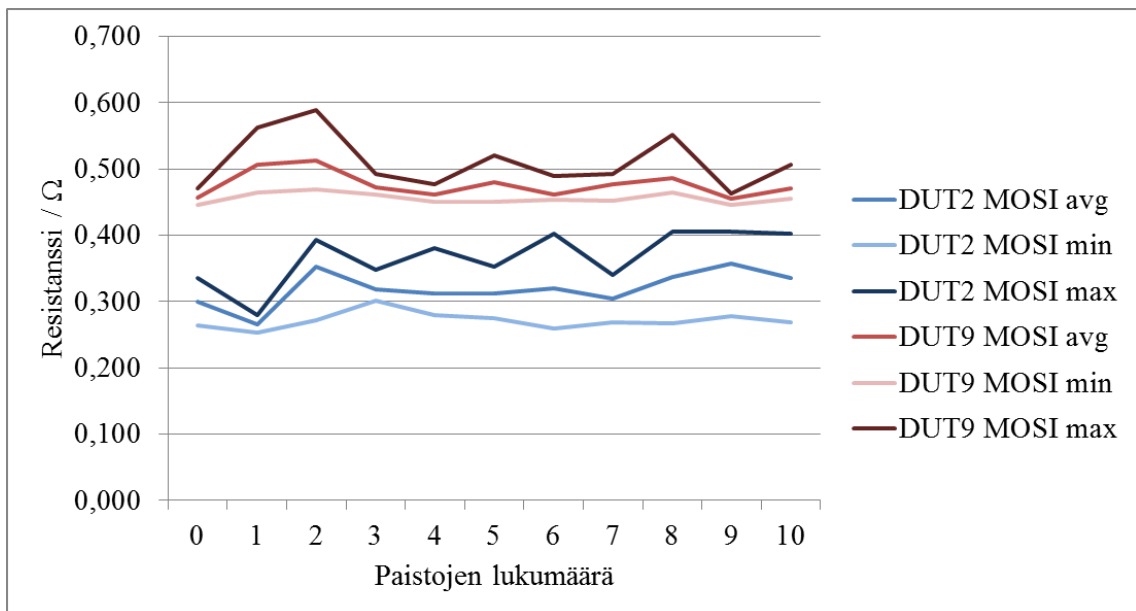


Kuva 47: Testipiirilevyn rakenteen poikkileikkaus. Oranssi on kuparia, keltainen eristetä. Kuva saatu ME PCB:n tarjoamasta Macaos-ohjelmasta.

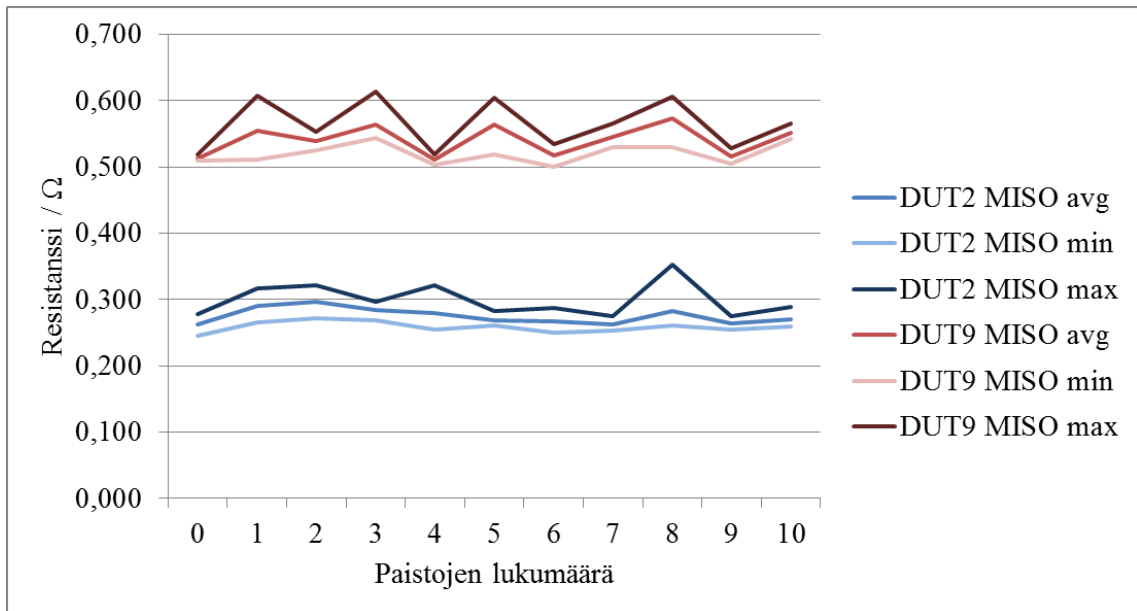
Liite D: Resistanssimittausten tulokset



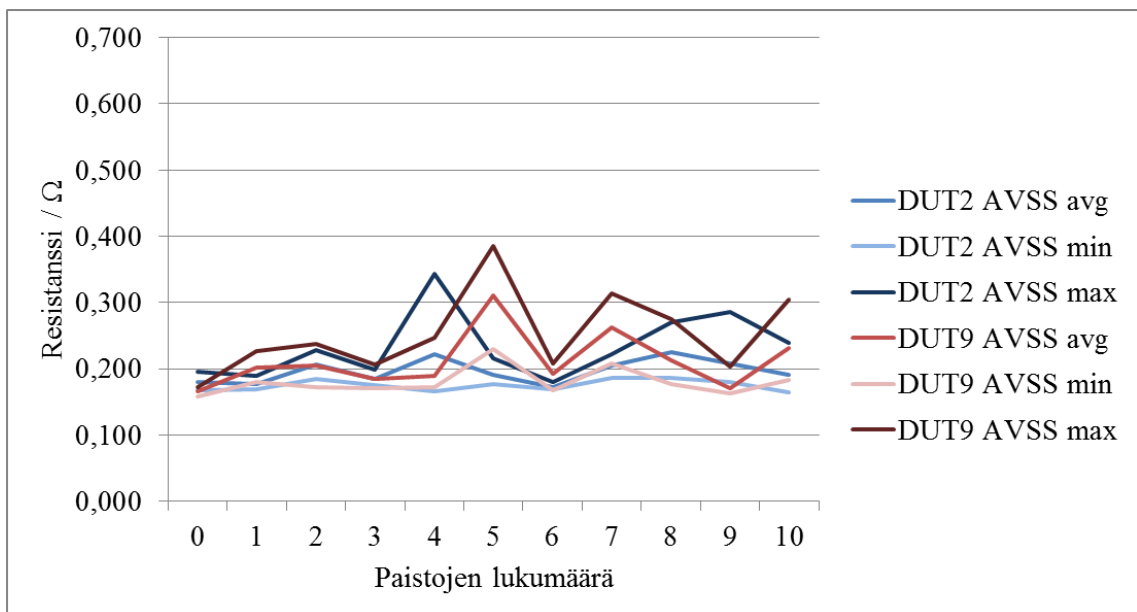
Kuva 48: SCK-linjojen resistanssit paistojen välissä.



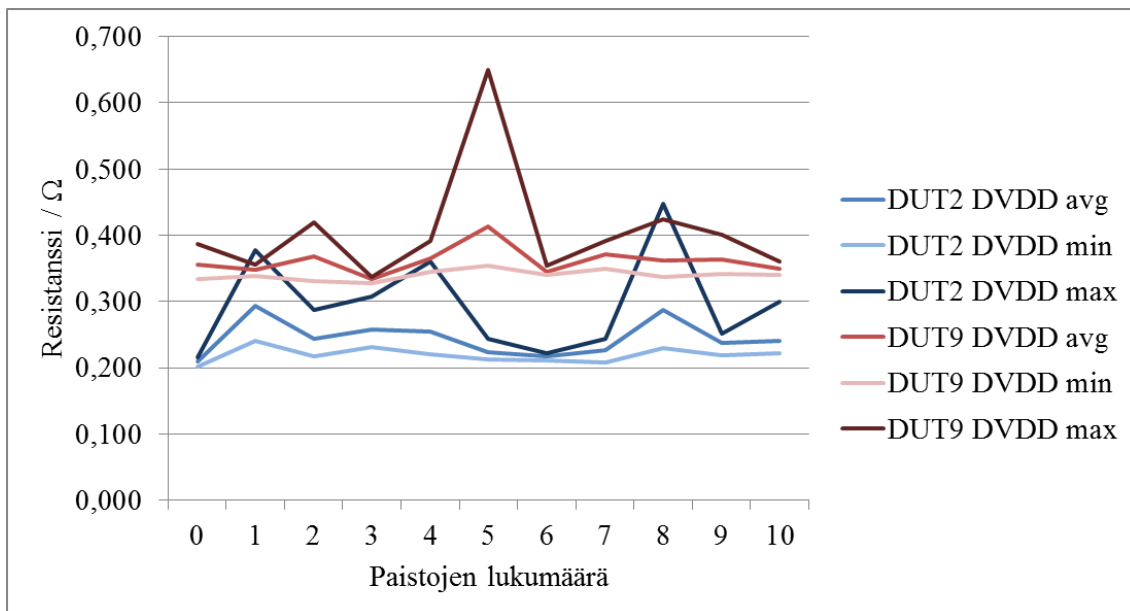
Kuva 49: MOSI-linjojen resistanssit paistojen välissä.



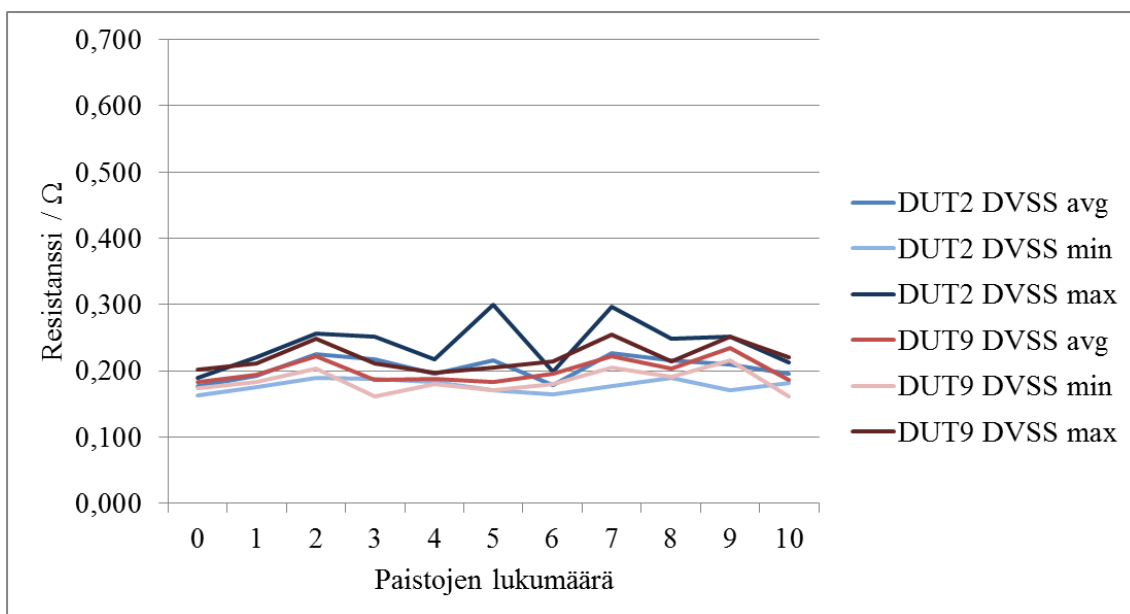
Kuva 50: MISO-linjojen resistanssit paistojen välissä.



Kuva 51: AVSS-linjojen resistanssit paistojen välissä.



Kuva 52: DVDD-linjojen resistanssit paistojen välissä.



Kuva 53: DVSS-linjojen resistanssit paistojen välissä.