

SATAKUNNAN AMMATTIKORKEAKOULU



Jyri Mäntysalo

2007

JOUSTAVAN PIIRILEVYN SUUNNITTELU

Tekniikka Rauma
Tietotekniikan koulutusohjelma

JOUSTAVAN PIIRILEVYN SUUNNITTELU

Mäntysalo, Jyri

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Rauma

Tietotekniikan koulutusohjelma

Yritys: Innova Elepro

Valvoja: DI Teijo Wahlman

Syyskuu 2007

Ohjaaja: lehtori, DI Kauko Peltonen

UDK: 621.38

Asiasanat: elektroniikka, elektroniikkateollisuus, eristeet, johteet, piirilevyt

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella joustava piirilevy Innova Eleprolle tutkimus- ja koulutuskäyttöön. Elepro tutkii isotrooppisten liimojen käyttöä joustavalla piirilevyalustalla. Koulutuskäytössä perehdytään joustavan piirilevyn kokoonpanoon. Työ kuuluu Länsi-Suomen lääninhallituksen Satapiilo EAKR-projektiin, jonka rahoittajana toimii Euroopan Unioni.

Työ toteutettiin modifioimalla Elepron valmistamaa HOGA-nimistä koulutus tuotetta. Laitteeseen suunniteltiin erillinen joustava näyttömoduuli. Näyttömoduuli edellytti myös uudelleensuunnittelun FR4-osuudelle. Suunnitteludokumentaatio valmistettiin Cadencen OrCAD-ohjelmistolla. Lisätavoitteena oli valmistaa joustavan piirilevyn suunnitteluun johdatteleva dokumentti, jota voidaan myöhemmin käyttää opetusmateriaalina Elepron kursseilla.

Projektin luonne muistutti tuotekehitystä ja tutkimusta. Julkaisuja aihepiiristä on saatavilla vähän ja suurin osa on vanhoja. Tästä johtuen teoriaosuuden työmäärä painottui tiedonhankintaan ja joustavan piirilevytekniikan suunnittelusääntöjen sekä materiaalitekniikan opiskeluun. Opinnäytetyön kirjalliseen osuuteen on tiivistetty tärkein informaatio joustavan piirilevyn suunnittelusta, jolloin dokumentaatio soveltuu myös koulutuskäyttöön. Suunnittelun lisäksi työssä syvennyttiin joustavan piirilevyn valmistus- ja kokoonpanotekniikoihin. Myös moduulitestaukseen on kiinnitetty huomiota.

Työn empiirinen toteutusvaihe sisälsi jäykän ja taipuvan osuuden suunnittelun, piirilevyjen tilaamisen sekä laitteen lopullisen kokoonpanon. Tässä osuudessa sovellettiin joustavan sekä perinteisen piirilevytekniikan elektroniikkasuunnittelun teoreettisia suunnittelumalleja ja -työkaluja.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi uusi laiteversio HOGA v5.0. Laitteen taipuva näyttömoduuli täytti Elepron tutkimus- ja koulutuskäyttöä varten asetetut vaatimukset. Kyseessä oli ensimmäinen Elepron tehtaassa valmistettu joustava piirilevy. Pastanpainossa esiintyi leviämisiongelmiä isotrooppisen liiman kanssa. Lopulta kokoonpano suoritettiin onnistuneesti käyttämällä tina-hopea-kupari-pohjaista pastaratkaisua.

FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT DESIGN

Mäntysalo, Jyri

Satakunta University of Applied Sciences

School of Technology Rauma

Information Technology

Commissioned by Innova Elepro

Supervisor: Teijo Wahlman, MSc (Eng)

September 2007

Tutor: Kauko Peltonen, MSc (Eng), Lecturer

UDC: 621.38

Keywords: electronics, electronics industry, dielectrics, conductors, printed circuit boards

The aim of this thesis was to design a flexible printed circuit (FPC) board for research and training use. The study was commissioned by Innova Elepro, which researches utilization of isotropic adhesives on FPC. The thesis is part of a larger project called Satapiilo EAKR financed by the European Union.

The main objective of this study was to modify an education product named HOGA. The product was divided into two modules. A detachable flexible display module and a new FR4 circuit board were designed by using the Cadence OrCAD software. The secondary aim was to produce a training manual concerning the FPC design.

The emphasis in the theoretical part was on knowledge acquisition and study of FPC design rules and techniques. The material was gathered and sorted out keeping the educational purpose in mind.

In the empirical part the theoretical design models and tools were applied in practice. The part consists of design work, ordering and final assembly. Manufacturing, assembly techniques and testing are also discussed.

As a result a new HOGA version was manufactured. The display module was the first FPC that has ever been assembled at the training factory of Innova Elepro. In spite of the problems in screen-printing using an isotropic adhesive, the assembly was carried out successfully using a tin-silver-copper based solution.

ALKUSANAT

Tämän insinööriyön suurin työmäärä kohdistui tiedon etsimiseen ja uusien asioiden opiskeluun, mikä on havaittavissa myös opinnäytekirjan teoriapainotteisesta sisällöstä. Kirjan alussa keskitytään materiaaleihin ja rakenteisiin, jotka ovat joustavan piirilevytekniikan keskeisimmät elementit. Tämän jälkeen esitellään lyhyesti HOGA-koulutustuote ja sen joustavassa piirilevyssä käytettävät komponentit. Joustavan piirilevyn suunnittelu käsitellään täysin omana lukuna. Teorian lisäksi opinnäytekirjan lopussa selostetaan kokoonpanovaihe eräänlaisena käytännön esimerkkinä sekä arviona suunnitteluvaiheen onnistumiselle.

Aihepiiri käsittää muutamia englanninkielisiä termejä, joiden käyttö on vakiintunut myös Suomessa. Tällaisten termien kohdalla lienee järkevä esittää ne tekstin yhteydessä myös englanninkielisinä. Pelkät vapaat suomennokset saattaisivat joutaa väärin tulkintoihin. Joustavassa piirilevytekniikassa, kuten tekniikassa yleensä, monien asioiden esittäminen englanniksi on paljon luontevampaa eikä suomenkielistä vastinetta aina ole edes olemassa.

Tämä insinööriyö on tarjonnut minulle ainutlaatuisen tilaisuuden tutustua elektroniikkatuotantoon ja joustaviin piirilevyihin nykyaikaisessa tuotantoympäristössä ja mielenkiintoisessa ilmapiiirissä. Haluan osoittaa kiitokseni opinnäytteen ohjajalle Kauko Peltoselle (SAMK), työn valvojalle Teijo Wahlmanille (Innova Elepro) ja projektiin osallistuneiden yritysten edustajille tästä mahdollisuudesta sekä erittäin hyvin sujuneesta yhteistyöstä. Lisäksi haluan kiittää avopuolisoani Sanna Simolaa kärsivällisyydestä ja kannustuksesta varsinkin työn kirjallisen osuuden loppuun saattamisen yhteydessä. Kiitos kuuluu myös alan pioneerille Joseph Fjelstadille, joka on myöntänyt luvan oman julkaisunsa sisältämän kuvamateriaalin käyttöön tässä opinnäytetyössä.

Raumalla 24. elokuuta 2007

Jyri Mäntysalo

TERMILUETTELO

Apical	Erään Kanegafuchi Chemical Industryn rekisteröimän polyimidi-filmin (PI) kaupan nimi.
Aramidi	Lyhenne aromaattisesta polyamidista, joka on synteettinen kuitu. Aramidikuitulajeista tunnettuja ovat DuPont'in Kevlar sekä Nomex.
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. <i>Computer Aided Design</i>).
Celantar	Erään Celanese Corporationin rekisteröimän polyesterifilmin (PET) kaupan nimi. Myöhemmin tuotenimi muutettiin nimeksi Hostaphan joka on rekisteröity Mitsubishi Polyester Film Groupin nimiin.
CSP	Pakkaus, jossa liitosnastat sijaitsevat pakkauksen alapinnalla (engl. <i>Chip Scale Package</i>).
Etsaus	Johdinkuvion valmistusmenetelmä, jossa ylimääräinen johdinkeros syövytetään pois hapon avulla.
FEP	Eräs PTFE:stä johdettu fluorimuovi (tetrafluorieteeni-heksafluoripropeeni).
Fiducial	Kohdistusmerkki.
Flex-to-fit	Staattinen joustavan piirilevyn sovellustyyppi, jossa piirilevyn joustavuutta hyödynnetään kokoonpanossa.
FPC	Joustava piirilevy (engl. <i>Flexible Printed Circuit</i>).
FPCB	Joustava piirilevy (engl. <i>Flexible Printed Circuit Board</i>).
FPW	Joustava piirilevy (engl. <i>Flexible Printed Wiring</i>).
FR4	Lasikuituvahvisteinen epoksilaminaatti, joka on yleisimmin käytetty liitosalusta. Lyhenne FR4 tulee palonkestävyysluokasta.
Gerber-X	Tiedostomuoto piirilevyn valmistustiedostojen koordinaattisityksille, joka sisältää myös apertuurit (Extended Gerber).
IPC	Elektroniikkateollisuuden standardointiorganisaatio (Association Connecting Electronics Industries).
Kapton	Erään DuPont'in rekisteröimän polyimidifilmin (PI) kaupan nimi.
LCP	Nestekidepolymeeri (engl. <i>Liquid Crystal Polymer</i>).
LED	Valodiodi, hohtodiodi, loistodiodi, ledi (engl. <i>Light-Emitting Diode</i>).
Melinex	Ks. Mylar.
Mylar	Kaupan nimi eräälle DuPont'in rekisteröimälle polyesterifilmille (PET).
Paneeli	Piirilevyaihiolle toteutettava usean piirilevyn ja niiden ympärillä olevan kehikon muodostama kokonaisuus.
PEN	Polyeteeninaftalaatti (engl. <i>polyethylenaphtalat</i>)
PET	Polyeteeni, (engl. <i>polyethylenterephtalat</i>), polyesteri
PI	Polyimidi.
PIC	Valotettava juotosmaski (engl. <i>photoimageable coverlayer</i>).
Pitch	Johdinväli.
PTFE	Fluorimuovi, joka tunnetaan paremmin nimellä Teflon (polytetrafluorieteeni).
PTH	Monikerrospiirilevyjen metalloidut läpiviennit eri kerrosten välillä (engl. <i>Plated-Through Hole</i>).
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (engl. <i>Pulse Width Modulation</i>).
Pädi	Juotostäplä (engl. <i>pad</i>)

RF	Radiotaajuus (engl. <i>Radio Frequency</i>).
RoHS	Euroopan Unionin säätämä direktiivi, joka rajoittaa vaarallisten aineiden, kuten lyijyn, käyttöä kulutuselektronikan valmistuksessa (engl. <i>Restriction of Hazardous Substances</i>)
SMD	Pintaliitoskomponentti (engl. Surface Mount Device)
SMT	Pintaliitostekniikka yleisesti (engl. Surface Mount Technology)
Stensiili	Reikälevymaski, jota käytetään pastan tai liiman painamiseen piirilevyille (engl. <i>stencil</i>).
Upilex	Kauppanimi UBE Industriesin valmistamalle polyimidifilmille (PI).
ZIF	Liitintyyppi, joka sallii liittämisen erittäin pienellä voimalla (engl. <i>Zero Insertion Force</i>).

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
TERMILUETTELO	5
1 JOHDANTO	9
2 TYÖN TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT	10
3 YLEISTÄ JOUSTAVISTA PIIRILEVYISTÄ	11
3.1 Määritelmät ja nimitykset	11
3.2 Nykytilanne	11
3.3 Joustavan piirilevyn edut ja haitat	12
3.4 Käyttökohteet	13
3.5 Valmistustekniikat	14
4 MATERIAALIT JA RAKENNE	15
4.1 Rakennevaihtoehdot	15
4.2 Materiaalien ominaisuudet	16
4.3 Eristekerros	17
4.4 Johdinkerros	20
4.5 Sidosainekerros	21
4.6 Pintakerros	22
4.7 Vahvikkeet	23
5 HOGA-KOULUTUSTUOTE V5.0	24
5.1 Tuotteen lyhyt kuvaus	24
5.2 HOGA v4.1:ssä esiintyneet ongelmat ja niiden ratkaisut	24
5.3 Testattavuuden huomiointi	25
5.4 Piirikaavion muodostus	27
5.5 Näyttömoduulin komponentit	28
5.5.1 Ledit	28
5.5.2 Vastukset	29
5.5.3 ZIF-liitin	29
5.5.4 Jännitelähde	30
6 JOUSTAVAN PIIRILEVYN SUUNNITTELU	32
6.1 Lyhyt johdanto joustavan piirilevyn suunnitteluun	32
6.2 Joustavan piirilevyn suunnittelijan näkökulmasta	32
6.3 Joustavalle piirilevylle asetetut vaatimukset	33
6.4 Johdinleveys ja -vahvuus	34
6.5 Rakenne ja materiaali	35
6.6 Suunnitteluohjelman valinta	37
6.7 Piirilevyn muoto	37
6.8 Komponenttien sijoittaminen	38

6.9	Juotostäplät, pädit ja johtavat läpiviennit.....	39
6.10	Johdinvedot	40
6.11	Kohdistusmerkit	42
6.12	Prototyypit ja mallit	43
6.13	Panelointi	44
6.14	Stensiili.....	47
7	KOKOONPANO	48
7.1	Yleistä kokoonpanosta	48
7.2	Jigin käyttö	48
7.3	Juotteen painaminen.....	49
7.4	Komponenttien ladonta	50
7.5	Juotosprosessi.....	50
8	PARANNUSEHDOTUKSET.....	52
9	YHTEENVETO	53
	LÄHTEET.....	55
	LIITTEET	56

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella joustava piirilevy Innova Elepron tutkimus- ja koulutuskäyttöön. Tutkimuksissa perehdytään erityyppisten juotostekniikoiden, kuten isotrooppisten liimojen käyttöön joustavalla piirilevyalustalla. Elepro on aiemmin tehnyt vastaavia tutkimuksia FR4-piirilevyalustalla matalan lämpötilan juotteista.

Innova Elepro toimii sähkö- ja elektroniikkateollisuuden sekä tietotekniikka-alan henkilöstökouluttajana. Taustaorganisaationa oleva Innova Länsi-Suomen Aikuis-koulutuskeskus on Laitilan ja Rauman muodostaman kuntayhtymän omistuksessa. Innova Elepro on toiminut Rauman Kaivopuiston teknologiakylässä vuodesta 2000. Elepron koulutustehdas käsittää nykyaikaisen tuotantolinjan, laboratoriot sekä tarvittavat opetustilat. Laitekantaan kuuluvat pintaliitosladontalinja, aaltojuotoskone lyijyttömille juotteille typpi-atmosfäärillä, CSP-korjausasema sekä digitaalinen röntgentarkastuslaite. Yhteistyötä tehdään myös Rauman teknologiakylässä sijaitsevan EMC-laboratorion kanssa.

Koulutuksen lisäksi Innova Elepro tekee sekä omaa että asiakasyritysten tuotteiden tutkimusta, tuotekehitystä, koe- ja piensarjatuotantoa. Suurin osa tutkimus- ja tuotekehitystoiminnasta tehdään verkostoyhteistyönä eri toimijoiden kesken. Tutkimusten lähtökohtana ovat yritysten nykyiset ja tulevaisuuden tarpeet.

Tämä opinnäytetyö on osa laajempaa Innovan hallinnoimaa projektia. Projekti on nimeltään Satapiilo EAKR (Euroopan aluekehitysrahasto), jolle rahoituksen on myöntänyt Länsi-Suomen lääninhallitus. Projektin myötä Elepro haluaa kasvattaa omaa sekä yhteistyökumppaneittensa osaamista joustavan piirilevyn suunnittelu-, tuotanto- ja testaustehtävissä. Projektissa on mukana myös Satakunnan ammatti-korkeakoulu.

2 TYÖN TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT

Työssä keskitytään joustavan piirilevyn suunnitteluun. Työn yhtenä tavoitteena on kerätä materiaali, joka perehdyttää lukijan joustavan piirilevyn suunnitteluun. Opinnäytteen dokumentointi on toteutettu mahdollisimman yksityiskohtaisesti vertaamalla sitä perinteiseen jäykän FR4-piirilevyn suunnitteluun. Opinnäytekirjaa voidaan käyttää koulutusmateriaalina, joka perehdyttää joustavan piirilevyn oikeaoppiseen suunnitteluun.

Varsinainen työosuus toteutetaan modifioimalla valmista HOGA-nimistä koulutustuotetta. Laite toimii ajastinkellona, jonka tekninen toteutus pohjautuu sulautettuun mikro-ohjaimen. Tuote on syntynyt kahden aikaisemman opinnäytetyön tuloksena. Varsinaisen kehitystyön aloitti Tomi Mattila vuonna 2000, ja tuotteen viimeisimmän version on suunnitellut Petri Kataja vuonna 2004. Laitteen modifiointi tapahtuu rajaamalla aikaisemman tuoteversion LED-näytön komponentit erilliseksi moduuliksi, joka toteutetaan joustavalle kytkentäalustalle. HOGAn toiminta on selostettu tarkemmin aikaisemmissa, edellä mainittujen henkilöiden kirjoittamissa opinnäytteissä.

Toimiva laitekokonaisuus edellyttää myös jäykän piirilevyosuuden uudelleen suunnittelun. Tässä opinnäytteessä jäykkä piirilevyosuus jätetään kuitenkin kokonaan selostamatta, sillä tässä pyritään keskittymään pelkästään joustavaan piirilevytekniikkaan. Jäykälle piirilevyosiolle tulevista komponenteista kirjassa käsitellään ainoastaan ZIF-liitin, jonka avulla joustava piirilevy kytketään erilliseen FR4-piirilevyosuuteen.

Jo työn alkuvaiheessa oli tiedossa, että länsimaista kirjallisuutta joustavasta piirilevytekniikasta on saatavilla vähän. Vaikka tekniikka on ollut kaupallisessa käytössä jo 1950-luvulta lähtien, kirjallisuutta asiasta ei ole kertynyt kovinkaan paljon. Olemassa oleva materiaali on melko vanhaa, ja se käsittelee lähinnä joustavassa piirilevytekniikassa käytettäviä materiaaleja. Tuorein, joskin melko pirstaleinen, informaatio löytyy valmistajien internetsivuilta.

3 YLEISTÄ JOUSTAVISTA PIIRILEVYISTÄ

3.1 Määritelmät ja nimitykset

IPC-T-50 (*Institute of Printed Circuits*) määrittelee käsitteen joustava piirilevy seuraavasti:

”A patterned arrangement of printed wiring utilizing flexible base material with or without flexible coverlayers”.

Vapaasti suomennettuna kyseessä on painettu johdinkuviorakenne, jossa hyödynnetään joustavaa pohjamateriaalia joko joustavien pintakerrosten avulla tai ilman.

Tarkalleen ottaen joustava piirilevy taipuu, mutta se ei juuri veny. Tämän vuoksi joustavista piirilevyistä voisi olla perusteltua käyttää nimitystä taipuisa tai taipuva piirilevy. Tässä työssä käytetään kuitenkin jo alalle vakiintunutta nimitystä joustava piirilevy. Kirjallisuudessa joustavista piirilevyistä käytetään lyhenteitä FPC (*Flexible Printed Circuit*) ja FPW (*Flexible Printed Wiring*). Myös kirjainlyhennettä FPCB (*Flexible Printed Circuit Board*) sekä englanninkielisiä termejä *flex print* ja *flexi circuits* näkee joskus käytettävän. Suomessa käytetään usein myös englannin kielestä johdettua nimitystä fleksi.

3.2 Nykytilanne

Joustavan piirilevyn käyttö kytkentäalustana on viime aikoina yleistynyt huomattavasti perinteisen FR4:n rinnalla. Joustava alustaratkaisu vastaa hyvin nykypäivän elektroniikkateollisuuden asettamiin vaatimuksiin ohuen ja samalla keveän rakenteensa ansiosta.

Fjelstad (2006, 2) kertoo Japanin johtavan joustavien piirilevyjen miljardien dollarien maailmanmarkkinoita. Tuotannon siirtyminen Kiinaan ja muihin Aasian mai-

hin on jättänyt USA:n taka-alalle. USA pysyttelee kuitenkin korkean teknologian, kuten suurtaajuussovellusten, johtomaana.

Tämän opinnäytteen kirjoittamishetkellä Suomessa toimii viimeisimpien tietojen mukaan ainoastaan kolme joustavia piirilevyjä valmistavaa yritystä. Näistä yrityksistä kahteen merkittävimpään on oltu yhteydessä opinnäytetyön aikana. Osa opinnäytekirjan sisältämästä tiedosta onkin peräisin piirilevyvalmistajien kanssa käydyistä puhelin- ja sähköpostikeskusteluista.

3.3 Joustavan piirilevyn edut ja haitat

Joustavassa piirilevyssä yhdistyvät sekä jäykän piirilevyn että pyöreän johtimen edulliset ominaisuudet. Muovattavissa olevan piirilevyalustan ansiosta laitteen elektroniikan kotelointi on paljon helpompaa ja vapaampaa. Mekaanisten liittimien tarve sekä samalla myös mahdollisten kytkentävirheiden määrä vähenee. Samalla värikoodeilta ja johdinnipuilta vältytään, kytkennät yksinkertaistuvat ja siirrettävän signaalin laatu pysyy mahdollisimman hyvänä. Myös impedanssit ovat paremmin hallittavissa ja ennustettavissa piirilevymateriaalin homogeenisemmän rakenteen ansiosta. (Telemeter Electronic 2002, 6.)

Joustavien piirilevymateriaalien kirjo on laaja. Sovellukset vaativat käytettäviltä materiaaleilta aina tiettyjä ominaisuuksia, jotka puolestaan määräävät materiaalin hinnan. Jotkut materiaalit ovat erittäin kalliita muihin verrattuna. Esimerkiksi polyimidi, on hyvin kallis materiaali, mutta se kestää erittäin korkeita lämpötiloja. Materiaaleihin perehdytään tarkemmin seuraavassa luvussa.

Yhtenä haittapuolena voidaan pitää joustavan piirilevyn vakioimatonta rakennetta. Jokaiselle sovelluskohteelle pitää yleensä räätälöidä sille sopiva rakenneratkaisu. Yksilöllinen tuote vaatii melkoisesti suunnittelutyötä sekä suuria investointeja tuotekohtaisiin työkaluihin. Elektroniikkatuotannossa tämän tyyppiset toteutukset vaikeuttavat tuotteen vaihtoa linjalla lisäten linjan uudelleenkonfiguroinnin vaatimaa aikaa. Näistä seikoista johtuen pienet tuote-erät, varsinkin prototyypit, tulevat

kalliiksi valmistaa. Tuote-erien määrää kasvattamalla kannattavuus paranee. (Stearns 1996, 9.)

3.4 Käyttökohteet

Joustavaa piirilevytekniikkaa käyttävät sovellukset jaetaan kahteen luokaan: dynaamisiin sekä staattisiin sovelluksiin. *Staattisissa sovelluksissa* piirilevyn taipuvuutta saatetaan hyödyntää pelkästään piirilevyn asentamisessa laitteeseen (engl. *flex-to-fit*), jonka jälkeen levyä ei ole enää tarkoitus taivutella (ja se ei aina ole edes mahdollista – riippuen käytettävästä materiaalista). Fjelstadin (2006, 4) mukaan staattinen sovellustyyppi on kaikkein yleisimmin käytetty. Jäykkien piirilevyjen mekaaniset asennusprosessit ovat monesti melko mutkikkaita, ja ne kuluttavat paljon resursseja. Tämän tyyppisissä sovelluksissa kokoonpanokustannuksia on mahdollista alentaa käyttämällä joustavaa piirilevyä. Joissakin tapauksissa kokoonpano voi olla täysin mahdotonta ilman taivuteltavaa piirilevyalustaa.

Dynaamisissa sovelluksissa piirilevylle kohdistuu toistuvia taivutuksia myös asennusprosessin jälkeen. Tyypillisiä dynaamisia sovelluksia ovat levyasemat, kamerat ja erityyppiset taipuvat näyttöratkaisut, joissa taivutuksia saattaa kertyä enimmillään jopa satoja miljoonia kertoja.

Esimerkki dynaamisesta sovelluskohteesta on kiintolevy, jossa joustava piirilevy tarjoaa taipuvan signaalireitin lukupään eli anturin ja muun elektroniikan välille. Joustavaa piirilevyä hyödyntävä PC:n kovalevy on esitetty alla kuvassa 1. Kovalevyn tyyppiset suurtaajuussovellukset vaativat täsmällistä ja mahdollisimman häiriötöntä signaalin siirtoa. Anturin ja esivahvistimen tulee sijaita mahdollisimman lähellä toisiaan, jotta signaali-kohina-suhde pysyy siedettävänä. Käyttämällä joustavaa piirilevyrakennetta esivahvistin on mahdollista asentaa aivan lukupään läheisyyteen, ja samalla vältetään ylimääräisiltä signaalia heikentäviltä liitoksilta.



Kuva 1. Joustavaa piirilevyteknikkaa sisältävä kovalevy.

3.5 Valmistustekniikat

Joustavia piirilevyjä valmistetaan käyttämällä joko roll-to-roll-tekniikkaa tai paneeliprosessia. Paneeliprosessi on kaikkein yleisimmin käytetty valmistustekniikka, ja se valittiin käytettäväksi myös tämän opinnäytetyön joustavissa piirilevyissä.

Roll-to-roll- eli rullalta rullalle -menetelmässä (myös engl. *reel-to-reel*) piirilevy-materiaalia käsitellään pitkinä nauhoina keloihin rullattuina. Prosessointi tapahtuu kahden kelarullan välissä olevalla suoraksi vedetyllä materiaaliosuudella. Tekniikka soveltuu parhaiten käytettäväksi silloin, kun valmistuserät ovat suuria. Tällöin tuotannon nopeista prosessointimenetelistä on eniten hyötyä ja työmäärä yhtä piirilevyä kohden on minimoituu mahdollisimman pieneksi.

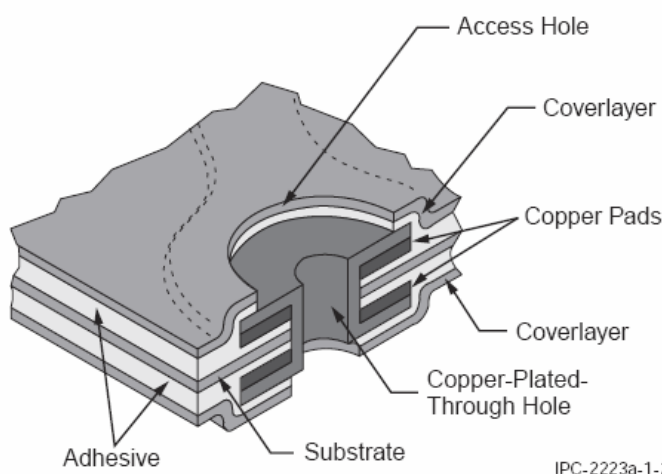
Paneeliprosessi on taas parhaimmillaan pienissä tuoteajoissa. Tämä valmistusprosessi on tuttu perinteisestä FR4-piirilevyvalmistuksesta, jossa piirilevyjä käsitellään erillisinä aihioihin paneloituina yksikköinä. Paneelitekniikalla valmistettava piirilevy voi olla muodoltaan monimutkainen, ja sen valmistus saattaa sisältää useita eri työvaiheita. Paneeliprosessissa työkalujen vaihto ei aiheuta merkittäviä viiveitä ja on siltä osin edullisempaa roll-to-roll-menetelmään verrattuna. (Stearns 1996, 125–127.)

4 MATERIAALIT JA RAKENNE

4.1 Rakennevaihtoehdot

Joustavan piirilevyn ominaisuudet riippuvat valmistustekniikan lisäksi myös piirilevyn rakenteesta sekä käytettävistä materiaaleista. Rakennevaihtoehtoja on olemassa useita. Näihin – varsinkin eri materiaaleihin – on syytä perehtyä ennen suunnitteluun ryhtymistä.

Joustavat piirilevyt valmistetaan laminoimalla johdinkerroksia eristekerrosten väliin. Kerrosrakenteet luokitellaan yksi-, kaksi- ja monikerrosrakenteiksi. Kerros määrä kertoo piirilevyn sähköä johtavien kerrosten eli johdinkerrosten lukumäärän. Yksikerrosrakenteeseen sopii parhaiten dynaamisiin käyttökohteisiin, joissa piirilevyltä vaaditaan kestävyyttä ja hyviä taivutusominaisuuksia. Hyvin monimutkaisissa piirilevyissä voidaan käyttää useampaa johdinkerrosta, jotka yhdistetään johtavilla läpivienneillä (engl. *plated through hole*) toisiinsa. Monikerrosrakenteissa on mahdollista käyttää normaalien läpivientien (engl. *via*) lisäksi haudattuja sekä piilotettuja läpivientejä. Tyypillinen 2-kerrosrakenteen on esitetty alla. (All Flex 2004.)



Kuva 2. Tyypillinen joustavan piirilevyn 2-kerrosrakenteen (IPC-2223A).

Joustava piirilevy voidaan laminoida myös suoraan jäykän piirilevyn väliin. Tällaista jäykän ja joustavan piirilevyn yhdistelmää kutsutaan yleisesti nimellä *rigid-*

flex. Rigid-flexin valmistuksessa syntyvää joustavaa osuutta käytetään yleensä pelkkänä johtimena ja komponentit sijoitetaan piirilevyn jäykälle osuudelle. Flex-rigid-rakenteessa vältetään erillisiltä signaalia heikentäviltä liittimiltä.

4.2 Materiaalien ominaisuudet

Vaikka monia joustavia materiaaleja on testattu elektroniikkateollisuudessa, vain muutamat niistä ovat nykyään laajemmin käytössä. Käytettävät materiaalit yksilöivät koko piirilevyn ominaisuudet.

Juotoslämpötiloja on jouduttu kasvattamaan RoHS-direktiivin vaikutuksesta ja samalla ovat materiaalien lämpötilakäyttötymisvaatimukset tiukentuneet. Lämpötilansieto on yksi tärkeimmistä joustavan piirilevyn materiaalien ominaisuuksista. Materiaalivalinnoissa tulee huomioida seuraavat ominaisuudet:

- lämpötilankesto
- lämmönjohtavuus
- mitanpitävyys
- vetolujuus / repäisylujuus
- sähköiset ominaisuudet
- taipuvuus (myös matalissa lämpötiloissa)
- kosteuden absorptiokyky
- kemikaalikestävyys
- homogeenisuus
- saatavuus
- hinta. (Fjelstad 2006, 41–43, 164–167.)

Raakamateriaalit, kuten filmit, foliot ja laminaatit, valmistetaan roll-to-roll-menetelmällä. Kun materiaaleja säilötään rullissa, jää taivutussäde materiaalin muistiin vielä pitkäksi aikaa valmistusprosessin jälkeen. Tämä kannattaa huomioida, sillä valmis piirilevy saattaa tästä syystä pyrkiä kaareutumaan. Hyvin voimakas kaareutuminen aiheuttaa vaikeuksia kokoonpanossa, mutta oikein suunniteltuna tätä ominaisuutta voidaan käyttää jopa hyödyksi tai ainakin kompensoida.

Piirilevy tulee asettaa aihiolle siten, että taivutus tapahtuu suuntaan, johon materiaali pyrkii luonnostaan taipumaan.

4.3 Eristekerros

Eristemateriaalina taipuvissa piirilevyissä käytetään dielektrisyysvakioiltaan alhaista polymeerifilmiä, joka toimii rakenteessa sähköisenä eristeenä. Eristemateriaalia voidaan kutsua myös perusaineeksi tai pohjamateriaaliksi (engl. *base material*), sillä se vaikuttaa eniten piirilevyn fyysisiin ja sähköisiin ominaisarvoihin sekä myös jonkin verran tuotteen kokonaishintaan. (Fjelstad 2006, 44.)

Joustavien eristeiden ominaisuuksissa on merkittäviä eroja, mutta pääsääntöisesti ne jaetaan kahteen ryhmään lämpötilasiedon mukaan: juottamista kestäviin sekä kestäättömiin materiaaleihin. Tavanomaisten joustavien eristemateriaalien ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Polyimidi (PI) ja polyesteri (PET) ovat tällä hetkellä kaikkein yleisimmin käytetyt eristemateriaalit. Polyimidi kestää yli 300 °C:n lämpötiloja, kun taas PET alkaa osittain sulaa jo yli 100 °C:n lämpötilassa. Tämän vuoksi PET soveltuu juotettaville piirilevyille vain rajallisesti. PET muodostaa läpinäkyvän kalvon. Polyesteriä sekä polyimidia on saatavilla useaa eri tyyppiä. Polyestereistä käytetyimpiä tuotemerkkejä ovat Mylar, Melinex ja Celanar sekä polyimidilla vastaavasti Kapton, Apical ja Upilex. (Fjelstad 2006, 50.)

Uusien materiaalien ja foliotekniikoiden käyttö on jatkuvasti lisääntynyt tavanomaisten ratkaisujen kuten polyimidin ja polyesterin rinnalla. Polyeteeninaftalaatti (PEN) on nykyään hyvin usein käytetty materiaali, joka houkuttelee edullisella hinnallaan.

Mielenkiintoisen eristetyyppiryhmän muodostavat aramidikuiduista valmistetut paperimaiset materiaalit. Aramidipapereista yleisin on Nomex, joka on tunnettu muun muassa paloturvallisista tekstiileistä. Kuparipinnoitettu aramidipaperi kestää hyvin juotosten vaatimat lämpötilat. Materiaalin heikkoudet ovat korkea kos-

teuden absorptiokyky sekä huono mitanpitävyys. Kohtuullisesta hinnastaan huolimatta aramidipaperin käyttökohteet ovat kuitenkin rajalliset. (Gilleo 2001, 24.)

Fluorimuovit, kuten PTFE ja sen johdannainen FEP, ovat ominaisuuksiltaan huipuluokkaa, mutta ne eivät sovellu dynaamisiin sovelluksiin kovinkaan hyvin. PTFE tunnetaan paremmin nimellä Teflon, joka kestää korkeita lämpötiloja ja toimii erinomaisena eristeenä. FEP on joustavampaa ja kovempaa mitä PTFE, mutta lämpötilakestoltaan se jää PTFE:tä heikommaksi. Sään ja kemikaalien kestävydet ovat näiden kahden välillä lähes vastaavat. Huono mekaaninen kestävyys kuten kuluminen asettavat merkittävimmät käyttörajoitukset fluorimuoveille. Fluorimuoveja käytetään jonkin verran RF-sovelluksissa.

LCP on eristemateriaalina melko uusi, ja sen vahvana erikoisuutena on alhainen kosteuden absorptiokyky. LCP:tä verrataan usein polyimidiin, jolla kosteuden absorptiokyky on taas melko suuri (jopa 3 %). Ne ovat molemmat kemiallisesti estettäviä, mikä mahdollistaa muodoiltaan mutkikkaiden piirilevyjen valmistuksen. (Fjelstad 2006, 49–50.)

Würth Elektronik on kehittänyt ensimmäisen kierrätyskelpoisen piirilevyrakenteen, joka on nimeltään TWINflex. Tämä perustuu joustaviin foliomateriaaleihin, kuten polyimidiin. TWINflexin tyyppiset uudet luontoa säästävät ratkaisut ovat erittäin tervetulleita kulutuselektroniikkateollisuuteen. (Würth Elektronik 2006.)

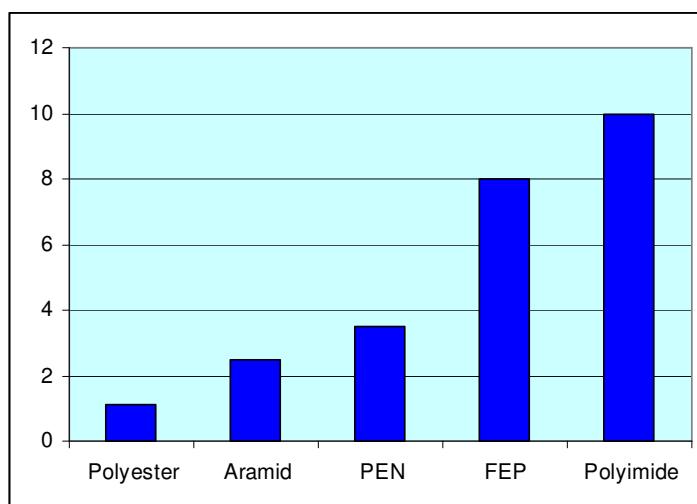
Taulukko 1. Joustavien eristemateriaalien ominaisuudet (Fjelstad 2006, 51).

Materiaali	Dielektrisyysvakio	Häviökerroin	Dielektrinen lujuus	Kosteuden imeytymisprosentti	Vetolujuus	Suhteellinen venymä
PET	3,2	0,005	178 V/mm	< 0,08 %	25 kpsi	~ 120 %
PI	3,5	0,003	178 V/mm	1,3 - 3,0 %	25 kpsi	~ 60 %
PEN	2,9	0,004	191 V/mm	1,00 %	30-35 kpsi	~ 75 %
LCP	2,9	0,003	152 V/mm	0,02 - 0,1 %	15-25 kpsi	~ 15 %
FEP	2,0	0,0002	127 V/mm	< 0,01 %	2-3 kpsi	~ 300 %
PTFE	2,5	0,0002	127 V/mm	< 0,01 %	15-25 kpsi	-
PVC	4,7	0,093	13 V/mm	< 0,5 %	5 kpsi	120 - 500 %
Aramidipaperi	2,0	0,007	10 V/mm	3,00 %	11 kpsi	~ 10 %

Eristemateriaalien hintaerot ovat huomattavia. Suhteelliset hinnat on esitetty alla olevassa pylväsdiagrammissa (Kuva 3). Esimerkiksi polyimidi on noin kymmenen

kertaa polyesteriä kalliimpaa. Eristemateriaali kannattaakin valita tarvittavien ominaisuuksien mukaan. Jos juotettavia komponentteja ei ole, ovat polyesterit kuten PEN ja PET edullisia vaihtoehtoja.

Eristemateriaalin vaikutusta elektroniikkalaitteen kokonaiskustannuksiin on hyvin vaikea arvioida. Käytettävä materiaali on riippuvainen vaaditusta laatutasosta sekä asennustekniikasta. Materiaalien suuresta hintaerosta huolimatta paneeliprosessissa vaikuttavimmat kustannustekijät kertyvät käytettävästä prosessilaitteistosta, prosessityöstä ja muista yleiskuluista. Esimerkiksi eristemateriaalin vaihto polyimidiä polyesteriin saattaa aiheuttaa ainoastaan 15–20 % kokonaissästöt yhtä valmistettavaa kohden. Materiaalikustannusten merkitys korostuu käytettäessä roll-to-roll-menetelmää. (Stearns 1996, 51.)



Kuva 3. Eristemateriaalien suhteellinen hintaeroarvio toisiinsa nähden (Fjelstad 2006, 49).

Edellä esitetyt hintaerot suhteessa eristemateriaalien lämpötilakestoon herättävät mielenkiinnon matalan lämpötilan juotteita kohtaan, sillä korkeita lämpötiloja kestävä materiaalit ovat yleensä kalliimpia. Jotkin isotrooppiset liimat kuivuvat jopa huoneenlämmössä, jolloin edulliset materiaalit ovat käyttökelpoisia. (Stearns 1996, 51–52.)

Ohuiden laminaattien käyttö takaa hyvät ja notkeat taivutusominaisuudet. Rakenteen ohuus on harvoin haitaksi. Stearnsin mukaan nykyiset eristeaineet ovat niin hyviä, että 25 mikronin eristekerros on jo enemmän kuin tarpeeksi. Väite pätee

käytettäessä alle 500 V:n jännitteitä. On kuitenkin huomattava, että näin ohuita piirilevyjä ei saa altistaa mekaaniselle hankausrasitukselle, ja myös eristemateriaalin paksuus vaikuttaa piirilevyn termisiin ominaisuuksiin. Tyypillisiä eristeinevahvuuksia ovat 50 µm ja 125 µm. (Stearns 1996, 32, 51–52, 54.)

Opinnäytteen kirjoitushetkellä Suomessa toimii kaksi piirilevyvalmistajaa, jotka valmistavat joustavia piirilevyjä polyimidistä, PEN:stä ja PET:stä. Kyseiset tehtaot valmistavat kaksi- tai useampikerroksisia joustavia piirilevyjä ainoastaan polyimidistä. (Sivinen 2006; Kivikunnas 2006.)

4.4 Johdinkerros

Kuten perinteisissä FR4-levyissä myös joustavissa piirilevyissä kupari on eniten käytetty johdinmateriaali. Joustavan piirilevyn erittäin ohuet, poikkipinnaltaan suorakaiteen muotoiset johtimet pystyvät johtamaan jopa 50 % enemmän virtaa kuin samankokoiset pyöreät johtimet. Mitä enemmän johtimella on ulkopinta-alaa, sen parempi virranjohtokyky sillä on. Suurempi ulkopinta-ala jäädyttää tehokkaammin. Maksimoidun ulkopinta-alan lisäksi joustavissa piirilevyissä käytetyt materiaalit yhdessä ohuen rakenteen kanssa muodostavat hyvin lämpöä johtavan kokonaisuuden. Paremmiin jäähtyvään rakenteeseen ansiosta voidaan käyttää entistä ohuempia johtimia. Suurtaajuussovelluksissa suuri ulkopinta-ala parantaa sähkövirran kulkua johtuen ns. ahtaumisilmiöstä. (Lenthor Engineering 2006, 41.)

Piirilevyn johdinkuvio voidaan valmistaa joko etsaamalla tai kasvattamalla. Useimmiten johdinkerros valmistetaan etsausmenetelmällä, jossa ylimääräinen metalli poistetaan kemiallisella syövytysprosessilla. Kasvatusmenetelmässä haluttu johdinkuvio muodostetaan ohuen metallikerroksen päälle elektrolyysin avulla. Kasvatusvaiheen jälkeen johtimien ympärille jäänyt alkuperäinen ohut metallikerros syövytetään kokonaan pois. Kasvatusmenetelmä sisältää useita eri työvaiheita ja on siksi etsaamista kalliimpi vaihtoehto. Käytettävä valmistusmenetelmä jää yleensä piirilevyvalmistajan päätettäväksi. (Fjelstad 2006, 44–45.)

Johtimien paksuus, leveys ja etäisyys tulee valita sähkövirran, suurimman sallitun lämpötilanousun ja halutun impedanssin mukaan. Tyypillisiä johdinvahvuuksia ovat 18 μm ja 35 μm . Johdinpaksuuden sekä -leveyden määrittäminen on selostettu tarkemmin luvussa 6.

4.5 Sidosainekerros

Sidosaine on joustavan piirilevyn heikko mutta useimmiten tarpeellinen komponentti, joka sitoo piirilevyrakenteen eri kerrokset toisiinsa. Sidosaineen ominaisuuksiin on syytä tutustua, varsinkin jos sovellukselle on asetettu erityisvaatimuksia kuten esimerkiksi RF-tasoi-
sten signaalien siirto. Suurtaajuisten signaalien siirrossa on suuri merkitys siirtotien impedanssilla, joka muodostuu osittain johtimen ympärillä olevan sidosaineen ominaisuuksien mukaan. Sidosaine määrää myös suurelta osin rakenteen kemikaalinsietokyvyn. (Stearns 1996, 86.)

Käytettävä sidosaine rajoittaa piirilevyn lämpötilansietoa, varsinkin kun eristeaineena käytetään korkeita lämpötiloja sietäviä materiaaleja kuten polyimidia. Tästä johtuen joustavien piirilevyjen valmistuksessa pyritään käyttämään korkeita lämpötiloja kestävä sidosainetta ja minimoimaan tarvittavan sidosaineen kerrospaksuus.

Joustavia piirilevyjä voidaan valmistaa myös ilman sidosainetta. Jättämällä sidosaine kokonaan pois saavutetaan paremmat sähköiset ominaisuudet. Ohuen ja tasaalaatuisen rakenteen ansiosta lämpötilansieto kasvaa ja samalla saavutetaan myös parempi taivutuskesto. Sidosaineettoman piirilevyn ominaisuudet muodostuvat pääsääntöisesti eristemateriaalin ominaisuuksien mukaan. (Fjelstad 2006, 44.)

Sidosaineettomien piirilevyjen valmistustekniikoita on useita. Yksi yleinen tapa on ruiskuttaa ohut, niin sanottu siemenkerros, puhdistetun eristemateriaalin päälle ja pinnoittaa se kuparilla tai jollakin muulla metallilla käyttäen elektrodepositiota (sähköhöyrystys). Menetelmä mahdollistaa erittäin ohuen johdinkerroksen valmistamisen. Toinen tapa on valaa eristekerros suoraan johdinmateriaalin päälle. Si-

dosaineeton rakenne on kalliimpi verrattuna sidosainetta käyttävään rakenteeseen. (Fjelstad 2006, 47–48.)

Fjelstadin (2006, 48) mukaan sidosaineeton rakenne sopii käytettäväksi flex-rigid- ja monikerroslevyissä. Tämän tyyppiset rakenteet ovat arkoja paksuussuunnassa (Z-akseli) tapahtuvalle lämpölaajenemiselle, joka rasittaa johtavia läpivientejä ja flex-rigid-rakenteita.

4.6 Pintakerros

Piirilevyn ylä- ja alapintaan voidaan laminoida yksi tai useampi kerros taipuvaa eristemateriaalia. Tätä kutsutaan pintakerrokseksi (engl. *coverlayer*). Pintakerrosta voidaan käyttää normaalin juotteenestopinnoitteen tavoin helpottamaan juottamista. Se tarjoaa myös fyysisen suojan johtimille. Pintakerrokseen tehdään avaukset komponenttien kontakteja varten. (Fjelstad 2006, 91.)

Juotosmaskina toimiva pintakerros saa uusia käyttötarkoituksia normaaleihin jäykkiin piirilevyihin verrattuna. Pintakerros vahvistaa koko piirilevyrakennetta sitomalla johtimet sekä juotosalueet pohjamateriaaliin. Tämä vähentää johdinkerroksen irtoamisriskiä pohjamateriaalista, mikä saattaa johtaa katkoksiin. Dynaamisissa sovelluksissa pintakerros kasvattaa taivutuskestoa. (Fjelstad 2006, 91.)

Monimutkaiset ja erittäin tarkat avaukset voidaan valmistaa käyttämällä FR4-levyistä tuttua valotettavaa pintakerrosta (engl. *photoimageable coverlayer*). Valotettavaa maskia käytettäessä tulee kuparoinnin olla tavallista ohuempi. (All Flex 2004, 6.)

Pintakerros voidaan valmistaa Gerber-tiedostojen sisältämästä juotosmaskidokumentista. Pienet komponentit saattavat tarvita avauksen koko komponentin alalta. Tällaisissa tapauksissa tulee avauksiin kiinnittää erityistä huomiota ja dokumentit on hyvä tarkistaa useaan otteeseen ennen valmistusta.

4.7 Vahvikkeet

Joissakin tapauksissa piirilevyn taipuvuus voi olla myös haitaksi. Tällöin pitää suunnitella jonkinlainen vahvikerakenne jäykistämään piirilevyä. Vahvikkeita käytetään yleensä kestävyuden parantamiseksi, asennuksen helpottamiseksi ja tukea vaativien komponenttien kannakkeena. Vahviketta voidaan käyttää myös apuna vedonpoistossa, häiriösuojauksessa ja jäähdytys-elementeissä.

Vahvikeratkaisuja on useita. Niiden materiaalit ja toteutustavat ovat erilaiset. Mahdollisia vaihtoehtoja kannattaa tiedustella piirilevyvalmistajalta. Hyviksi todettuja vahvikemateriaaleja ovat FR4, alumiini, ruostumaton teräs, polyimidi ja lasikuitulevy. Gilleanin (2001, 188) mukaan alumiinin käyttö vahvikkeena on yleistynyt hyvien lämmönjohto- ja elektromagneettisen suojausominaisuuksien vuoksi. On myös huomattava, että vahvikkeissa ei saa olla teräviä reunoja, jotka ovat eristemateriaalin kanssa kosketuskontaktissa. Tällaiset rasisuspisteet saattavat johtaa johdinkatkoksiin.

Erillisen vahvikepalan kiinnittäminen piirilevyn pintaan on useimmiten käytetty menetelmä. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää lämpö- tai paineherkkää materiaalia, joka kiinnitetään lämmön tai korkean paineen avulla. Rakenne sopii erittäin hyvin käytettäväksi ZIF-liittimien kanssa. Joustavan piirilevyn toiselle puolelle sijoitetaan kontaktipinnat ja toiselle kiinnitetään vahvikepala. Vahvikkeen avulla liitoksesta saadaan tukeva ja piirilevyn paksuus voidaan asettaa liittimelle sopivaksi.

Laminointitekniikalla vahvikkeeksi voidaan laminoida useampi kerros eristemateriaalia. Myös tämä rakenne sopii ZIF-liitoksille. Yksi tapa on jättää liittimelle tukeva piirilevyosuus ylipitkäksi ja laminoida se varsinaisen piirilevyn alle (Sivinen 2006). Jokainen laminointikerta lisää aina piirilevyn valmistuskustannuksia.

Edullinen ja varsin helposti toteutettava vahvike saadaan jättämällä ”ylimääräistä” johdinmetallia vahvistusta vaativille alueille. Menetelmä ei kasvata piirilevyn paksuutta kovinkaan paljoa, mutta metallifoliokerros parantaa levyn repeytymiskestoja merkittävästi. Kyseistä menetelmää näkee usein käytettävän asennusreikien ympärillä sekä piirilevyn reunoissa.

5 HOGA-KOULUTUSTUOTE V5.0

5.1 Tuotteen lyhyt kuvaus

Tässä opinnäytetyössä modifioitava koulutustuote on nimeltään HOGA. Laite toimii ajastinkellona, jonka toteutus perustuu sulautettuun Atmel ATmega8L-mikro-ohjaimen. Mikro-ohjaimelle on kytketty 4 MHz:n kellopulssi. Laitteen tekniikka ja sen toiminta on tarkemmin selostettu aikaisemmissa Tomi Mattilan ja Petri Katajan kirjoittamissa opinnäytetöissä.

Työssä hyödynnetään laitteen aikaisempaa dokumentaatioversiota 4.1 (neljännen version ensimmäinen revisio). Uusi joustavalla näyttömoduulilla toteutettu laiteversio on järjestysluvultaan viides. HOGA v5.0:n kytkentäkaaviot, layoutit ja näyttömoduulin keskipistelista ovat liitteinä kirjan lopussa.

5.2 HOGA v4.1:ssä esiintyneet ongelmat ja niiden ratkaisut

HOGA v4.1 näytön segmenteissä on havaittavissa kirkkauseroja. Tätä voidaan pitää häiriönä laitteen toiminnassa. Häiriö on viasta aiheutuva ulkoisesti havaittava poikkeama määrittelystä. Sähkölaboratoriossa suoritetuissa testauksissa huomattiin kaksi toisistaan riippumatonta häiriötä:

- Näyttöluvuista riippuen eri segmenttien välillä on havaittavissa kirkkauseroja.
- Numeroista muodostuu himmeitä ”varjostumia” väärin näyttöihin.

Mittauksista ilmeni, että segmenttien kirkkausero johtuu resistanssiltaan liian suuriksi mitoitetuista transistorien kantavastuksista. Virransyöttökyky jää ledeille liian pieneksi. Asia varmistettiin vielä laskemalla. Laitteen kytkennässä PNP-tyypin transistorien on tarkoitus toimia kytkiminä. Liian suuren resistanssin vaikutuksesta kantajännite jää loogisen kytkimen sulkutilassa liian pieneksi ja transistori ei saavuta haluttua saturaatiotilaa. Saturaatio on niin sanottu täysin johtava tila, jolloin ”kytkin on kiinni”.

Varjostuminen eli numeron toistuminen himmeänä viereisellä näytöllä johtuu todennäköisesti väärin toteutetusta multipleksauksesta. Oletus perustuu havaintoihin ja laboratoriossa suoritettuihin oskilloskooppimittauksiin. Oskilloskooppimittaukset on esitetty liitteessä 1. Oskilloskooppikuvista voidaan havaita, että numeron – eli näytön – sytytyshetkellä jännitekäyrän nousu on hyvin jyrkkä verrattuna numeron sammuttamishetkeen. Jyrkkyuseron lisäksi jännitteen käyttäytyminen ei ole ledin sammutushetkellä läheskään yhtä lineaarista mitä syttymishetkellä. Aluksi jännite laskee nopeasti, mutta muutosnopeus pienenee lähestyttäessä 0 V jännitettä. Kun seuraava multipleksattava näyttö sytytetään, vaihtuu myös näytettävä numero. Oskilloskooppikuvat osoittavat että edeltävässä näytössä on vielä jännitettä jäljellä, kun seuraava näyttö jo sytytetään. Jos näyttönumero on tällä samalla ajanhetkellä jo muuttunut, saattaa se näkyä himmeänä edeltävällä näytöllä.

Multipleksauksessa esiintyvä ohjelmallinen vika on korjattavissa laitteen ohjelmakoodiin. Muutokset mikro-ohjaimen ohjelmakoodiin eivät vaadi minkäänlaisia muutoksia piirisuunnitteluun. Edellä esitetyn virheanalyysin mukaan multipleksauksen toteutus tulee miettiä uudelleen.

Voidaan myös todeta, että laitteiston komponenttien mitoituksissa ei ole otettu huomioon näytön multipleksauksesta johtuvaa tehohäviötä. Tehohäviö muodostuu vuorottelun aiheuttamasta pulssinleveysmodulaatiosta (PWM), jolloin yhdelle näytölle (kolmesta) syötettävä teho on likimäärin vain kolmasosa jatkuvaan tehoon nähden. Tästä johtuen ledien virranrajoitusvastusten mitoitukset tulee laskea tehollisilla arvoilla. Tehollinen virta on likimain kolmasosa nimellisvirrasta.

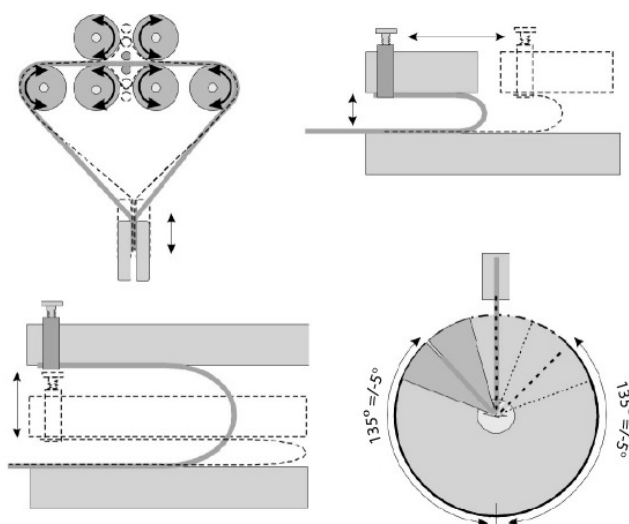
5.3 Testattavuuden huomiointi

Fjelstadin (2006, 69) mukaan näkökohdat miten, milloin ja missä testaus suoritetaan, jäävät usein kokonaan huomioimatta tai ne huomioidaan vasta suunnitteluprosessin jälkeen. Testaus kannattaa ehdottomasti ottaa huomioon ennen suunnitteluprosessiin ryhtymistä, sillä testausprosessissa saatetaan tarvita erillisiä testi-kohtaisia kontaktipintoja. Aluksi tulee selvittää, mikä on testauksen varsinainen tarkoitus ja minkä tyyppiselle tai tasoiselle testaamiselle on tarvetta. Asettaako

laadunvarmistus testaustarpeen vai onko kyseessä pelkästään tuotteen toiminnan todennus?

Elektronisten testien lisäksi kannattaa suorittaa myös mekaanisia testejä. Esimerkkejä testilaitteistosta on esitetty kuvassa 4. Yleisin testattava ominaisuus on taivutuskesto. Taivutuskeston määrittäminen on tärkeää varsinkin dynaamisille sovelluksille. Ennen taivutustestejä on selvitettävä seuraavat tiedot joustavasta piirilevysovelluksesta ja sen käytöstä:

- taivutuskohta
- taivutussäde
- taivutuskulma
- taivutussuunta
- taivutuskertojen määrä. (Fjelstad 2006, 173.)



Kuva 4. Testausmenetelmiä mekaanisille testeille (Fjelstad 2006, 175).

Juottuvuuden testaamisessa voidaan hyödyntää valmiina olevia standardeja. Fjelstadin (2006, 177) mukaan EIA/IPC-J-Standard-001 -teollisuusstandardi on vähitellen korvannut pitkään yleisesti käytössä olleen standardin IPC-S-804.

HOGAn joustavan piirilevyosuuden testaamisen tarkoituksena on tutkia juotosliitosten hyvyttä. Mittauksiin saatetaan sisällyttää myös mekaanisia rasitustestejä, jolloin näytön toiminnan tarkistus tulee toteuttaa reaaliaikaisena.

HOGAn joustava näyttömoduuli ei sisällä rinnan kytkettyjä komponentteja, joten piirin toiminnan tarkistus on suoraviivaista. Jos sarjakontaktissa esiintyy yksikin katkos, virtaa ei piirissä tämän jälkeen enää kulje. Edellä esitetystä johtuen näyttömoduulissa esiintyvät toimintahäiriöt ovat havaittavissa visuaalisesti. Mittalaitteet ja käyttöjännitteet kannattaa kytkeä ZIF-liittimen nastoihin, jolloin myös liitosrajapinta tulee testattua.

Näyttöjen multipleksaus aiheuttaa omat ongelmansa testaamiseen. Ledien etuvastukset on mitoitettu syöttämään virtaa vain yhdelle numerolle kerrallaan. 0402-kotelokoon vastukset on valmistettu kestäämään alle 1/16 W tehoa.

Ongelma voidaan ratkaista käyttämällä tuotekohtaista multipleksaavaa testiohjelmää, joka simuloi laitteen todellista toimintaa. HOGAn testaamisessa voidaan hyödyntää Rauman EMC-laboratorion Agilent tiedonkeruu- ja mittauslaitteistoa. Testiohjelman ohjelmointiympäristöksi sopii esimerkiksi National Instrumentsin graafinen LabVIEW, joka on yhteensopiva Agilentin laitteiston kanssa. Toinen ohjelmistovaihtoehto voisi olla Hewlett Packard VEE.

5.4 Piirikaavion muodostus

HOGAn uusi versio on muodostettu erottamalla näyttömoduulin komponentit muista komponenteista. Erotetut lohkot tallennettiin kumpikin erillisiksi projekteiksi (HOGA Flex ja HOGA Rigid). Piirilevylohkojen yhdistämistä varten on jäykälle alustalle lisätty 10-napainen liitin. Liitin kytketään suoraan joustavan piirilevyn kontaktipintoihin. Tässä vaiheessa on hyvä miettiä liitoksen rakenne ja liittimen nastajärjestys. Tärkeintä on tietää, sijaitsevatko kontaktipinnat liittimen ylä- vai alapinnalla. On myös olemassa liittimiä, jotka on varustettu sekä ylä- että alapinnassa sijaitsevilla kontakteilla. Piirikaaviot sekä layoutit on liitetty kirjan loppuun.

5.5 Näyttömoduulin komponentit

Näyttömoduulille sijoitettavat komponentit ovat tyypiltään pintaliitoskomponentteja (SMD). Joustava piirilevy tarjoaa lämpölaajenemisen kannalta stabiilin alustan pienikokoisille pintaliitoskomponenteille, joten pintaliitostekniikka sopii erittäin hyvin käytettäväksi joustavan piirilevyn kanssa. (Fjelstad 2006, 17.)

Pienet kotelokoot asettavat omat haasteensa ladontaan, varsinkin jos käytetään isotrooppisia liimoja. Tarkoitus on tutkia liimasidoksen pitävyyttä ja johtavuutta erikokoisilla komponenteilla. Elepron aikaisemmissa tutkimuksissa sekä tuotantoerissä on todettu pienimmäksi isotrooppisten liimojen kanssa käytettäväksi johdinleveydeksi 1,0 mm. Määritetty minimi johdinleveys rajoittaa joidenkin komponenttien käyttöä.

5.5.1 Ledit

Laitteen näyttö muodostuu kolmesta 7-segmenttinäytöstä, joiden segmentit on toteutettu SMD-tyypin ledeistä. Selkeyssyistä pystysegmentit muodostetaan kahdella sarjaan kytketyllä ledillä. Yksi 7-segmentti muodostuu 11 ledistä, joten niitä tarvitaan yhteensä 33 kpl aina yhtä piirilevyä kohden. 7-segmenttinäytöt kytketään yhdeksi ryhmäksi, joka sisältää kolme yhteisanodinäyttöä (engl. *common anode*).

Ledien melko suuri määrä yhtä tuotetta kohden vaikuttaa merkittävästi tuotteen kokonaishintaan. Tämän vuoksi alhainen hinta muodostuu tärkeäksi valintakriteeriksi valittaessa tuotteelle sopivaa LED-tyyppiä.

Ledien kotelotyyppiksi projektin alussa oli ehdotettu 0603 ja 0805. Näistä valittiin suurempi, sillä näyttönumeroiden koko päätettiin pitää samana. Vanhassa HOGA-versiossa on käytetty 1206-kotelokoon ledejä, jotka on aseteltu hyvin lähelle toisiinsa. Niiden korvaaminen 0603-kotelotyyppillä muodostaa pistemäiset näyttösegmentit, joita on hyvin vaikea lukea.

5.5.2 Vastukset

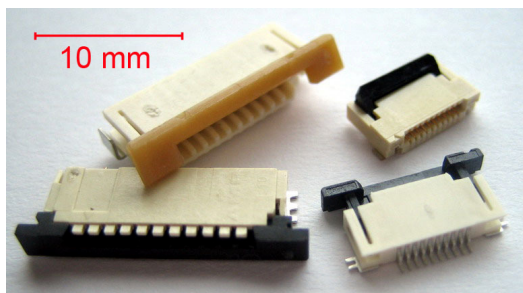
Joustavaan näyttömoduuliin päätettiin sijoittaa myös ledien virranrajoitusvastukset eli niin sanotut etuvastukset. Tällöin moduulin testaaminen yksinkertaistuu, sillä erillisiä ulkoisia vastuskytkentöjä ei tarvita. Virranrajoitusvastuksia tarvitaan yhteensä 10 kappaletta: yksi jokaiselle segmentille (7 kpl) sekä yksi jokaisen lediryhmän yhteisanodille (3 kpl). Vastusten kotelotyypiksi päätettiin valita pienin mahdollinen, jotta piirilevy olisi mahdollisimman hyvin taivuteltavissa. Samalla päästään testaamaan tuotantolinjan laitteiston kohdistustarkkuutta joustavalle piirilevyille. Ladontakoneen spesifikaatiossa pienimmäksi käytettäväksi kotelokooksi on määritelty 0402. Tämä SMD-kotelokoko valittiin HOGAn näyttömoduulin etuvastuksille.

5.5.3 ZIF-liitin

Vaatumuksena on käyttää jonkinlaista liitintä joustavan näyttömoduulin kytkemisessä jäykkään piirilevyosioon. Tarkoitukseen valittiin ZIF-liitin (*Zero Insertion Force*), joka on joustavien piirilevyjen kytkemisessä yleisimmin käytetty liitintyyppi. Nimensä mukaan liitin mahdollistaa asennuksen erittäin pienellä voimalla. Liitintyyppi soveltuu hyvin myös moduulin testaamiseen.

Kontakteja HOGAn näyttömoduulin liittimessä tarvitaan 10 kpl: yksi kullekin segmentille sekä yksi jokaisen näytön yhteisanodille. Kontaktipinnat on helppoin sijoittaa joustavan piirilevyn komponenttipuolelle, jolloin säästytään turhilta läpivienneiltä. Näytön asento määrää käytettävän liittimen mallin, joka HOGA:ssa on mallia ”top contact”. Tässä liitinmallissa kontaktipinnat sijaitsevat liittimen yläpinnassa.

Koska liitin on projektin kannalta keskeinen komponentti, sopivia malleja tilattiin etukäteen vertailtavaksi. Kuvassa 5 esitetyt vertailuun valitut liittimet ovat tyyppilisiä ZIF-liitinmalleja. Näistä Omron poikkeaa muista ratkaisuista lukitusmekanismillaan. Kaikille vertailun liittimille luvataan sama 0.5 A:n nimellisvirta, joka on laitteen käytössä riittävä.



Kuva 5. Vertailuun valitut ZIF-liittimet. Ylhäällä vasemmalta lukien Molex 1mm ja Omron 0,5mm. Alhaalla Tyco Electronix 1mm ja 0,5mm.

Kontaktipintojen sijainti joustavalla piirilevyllä sekä käytettävä asennusratkaisu määräävät käytettävän liitinmallin. Vertailuun valitussa Omronin liitinmallissa on lukitussalvalla toteutettu mekanismi, joka mahdollistaa molemmille puolille sijoitettavat kontaktipinnat. Kyseistä liitintyyppiä on saatavilla ainoastaan 0.5 mm johdinvälillä (engl. *pitch*), joka on tähän projektiin liian pieni johtuen isotrooppisen liiman käytön aiheuttamista reunaehdoista.

Liittimistä työhön valittiin Molex (1 mm pitch), jota valmistetaan tarvittavilla yläpuolisilla kontakteilla. Vertailtavista liittimistä Molex vaikutti mekanismitaan ja rakenteeltaan kaikkein tukevimmalta.

Liittimien ominaisuuksia tutkittaessa huomiota herätti niiden vähäinen liitoskertojen kesto. Vain maksimissaan muutaman kymmenen liitoskerran kestävä liitin rajoittaa testaamista ja saattaa heikentyvillä kontakteilla vaikuttaa jopa testituloksiin. Liitoskertojen määrä on huomioitava testauksissa.

5.5.4 Jännitelähde

Alkuperäinen HOGA on suunniteltu 6 V:n käyttöjännitteelle, joka muodostetaan neljällä AA-paristolla. Aluksi oli ajatuksena madaltaa jännite 3 V:iin kahdella AA-paristolla toteutettuna. Käytössä oleva mikrokontrolleri (Atmega8L) pystyy operoimaan jopa 2,7 V:n jännitteellä. Tavoitteesta jouduttiin kuitenkin luopumaan, sillä kahden ledin sarjankytkentä vaatii jännitteeksi 4 voltia. Tästä johtuen käyttöjännite päätettiin jättää 6 V:iin ja sen toteutus vastaavanlaiseksi mitä HOGA v4.1:ssä. Jännitelähteen toteutus on mahdollista myös kahdella sarjaan kytketyllä

3 V:n nappiparistolla, jolloin fyysinen koko on keveämpi ja siten tuotteelle sopivampi. Etuvastusten pieni kotelokoko (0402) yhdistettynä 6 V:n käyttöjännitteelle vie vastusten tehonkeston äärimmilleen. Tämä saattaa pienentää vastusten elinikää.

6 JOUSTAVAN PIIRILEVYN SUUNNITTELU

6.1 Lyhyt johdanto joustavan piirilevyn suunnitteluun

Joustavan piirilevyn suunnittelu- ja valmistusprosessit muistuttavat hyvin paljon perinteisen FR4-piirilevytekniikan vastaavia. Stearnsin (1996, 20) mukaan tämä saattaa johdattaa aiemmin pelkästään FR4-levyjä käyttäneen suunnittelijan sekä asiakkaan siihen uskoon, että opitut tiedot riittävät joustavan piirilevytekniikan hallitsemiseen. Uskomuksesta saattaa seurata epäonnistuminen. Joustavan piirilevyn suunnittelu on perinteiseen jäykän piirilevyn suunnitteluun verrattuna suuruusluokaltaan paljon vaativampaa (Stearns 1996, 30).

Yhteistyö suunnittelijan ja piirilevyvalmistajan välillä on yksi tärkeimmistä seikoista joustavissa piirilevyprojekteissa. Valmistajan on pystyttävä selkeästi määrittelemään valmistusprosessin asettamat reunaehdot, joita suunnittelijan tulee noudattaa. Tiivis yhteistyö eri osapuolten kesken auttaa varmistamaan vaatimusten mukaisen lopputuloksen. Hyvä lopputulos tyydyttää asiakasta ja tuotteen käyttäjiä.

Tässä luvussa käydään läpi joustavan piirilevyn suunnittelulle asettamia erityisvaatimuksia. Asiat esitetään vertailemalla, miten joustava piirilevy eroaa perinteisestä FR4 -levyn suunnittelusta. Luvussa esitettyä teoriaa tukevat käytännön esimerkit HOGA-koulutustuotteen suunnittelusta ja toteutuksesta. HOGAn joustava näyttömoduuli ei pidä sisällään läheskään kaikkia joustavan piirilevyn suunnittelussa käytettäviä tekniikoita. Tämän vuoksi esimerkkejä on lisätty eri lähteistä.

6.2 Joustavan piirilevy suunnittelijan näkökulmasta

Joustavaa piirilevyä voi taittaa, taivuttaa, kiertää ja rullata. Useat tilaa vievät jäykät piirilevy-yhdistelmät voidaan korvata yhdellä ohuella piirilevyllä, jolloin suunnittelija voi saavuttaa parhaimmillaan 75 %:n tilansäästön. On myös mahdollista, että käytössä olevaa joustavaa piirilevyä voidaan taivutella jopa

500 miljoonaa kertaa ilman, että laitteessa esiintyy minkäänlaisia vikoja. Perinteisellä jäykällä piirilevyllä tämä ei onnistu. (Lenthor Engineering, 2007.)

Joustavan piirilevyn suurin hyöty näkyy suunnittelijalle. Joustava kytkentäalusta mahdollistaa lähes vapaamuotoisen 3D-suunnittelun. Perinteinen jäykän piirilevyn suunnittelu kohdistuu lähinnä kahteen ulottuvuuteen eli yhdelle työskentelytasolle, ellei erillisiä piirilevyrakenteita yhdistetä liittimillä tai kaapeleilla. Joustavaa piirilevyä käyttämällä jokin tietty komponentti voidaan sijoittaa lähes mihin kohtaan tahansa laitteen kotelointia. Lisäksi kokonaisvaltaisella ja hyvin hallitulla 3D-suunnittelulla voidaan pienentää elektroniikan vaatimaa tilantarvetta.

Vaikka joustavan piirilevyn käyttöä puoltavat sen 3D-ominaisuudet, kolmiulotteisuuden merkityksen kasvaminen myös monimutkaistaa suunnitteluprosessia. Elektroniikkasuunnittelun lisäksi suunnittelijan tulee entistä tarkemmin huomioida laitteelle asetetut mekaaniset sekä materiaalitekniset vaatimukset. Jo pelkästään joustavien piirilevymateriaalien tunteminen sekä niiden taivutusominaisuuksien hallitseminen on elektroniikkasuunnittelijalle varsin haastava tehtävä. Joustavan piirilevyn suunnittelussa korostuu elektroniikan, mekaniikan sekä materiaalitekniikan keskinäinen vuorovaikutus.

6.3 Joustavalle piirilevyllä asetetut vaatimukset

Esivaatimusten selvittäminen on monesti melko hankalaa ja joskus myös aliarvostettua. Määrittely on kuitenkin hyvin tärkeä osa koko laitesuunnitteluprosessia, ja esitutkimus onkin nimityksenä paikallaan. Joustavan piirilevyn suunnittelussa esitutkimuksen tärkeys kasvaa. Vähintäänkin seuraavat tiedot tulee olla selvillä:

- tarvittavat mekaaniset määrittelyt ja mittapiirrokset
- elektroniset vaatimukset (kuormavirrat, resistiivisyys ja suojaus)
- kokoonpano- ja huoltotoimenpiteet (laitteen avaaminen)
- ympäristö- ja testivaatimukset (testiolosuhteet)
- dokumentointi ja sertifiointi
- kustannustavoitteet.

Näiden tulee olla tarkasti määriteltyjä ja täysin valmiita ennen varsinaiseen suunnitteluun ryhtymistä. (Stearns 1996, 30.)

Esivaatimukset ovat ehtona halutunlaisen tuotteen aikaansaamiselle. Ilman esivaatimuksia ei pystytä jälkikäteen selvittämään, onko valmis tuote oikeanlainen. Tarkat spesifikaatiot helpottavat piirilevyn suunnittelussa, ja niitä hyödynnetään myös laitteen testaamisessa. Monilla piirilevyvalmistajilla on omille tuotantoprosesseilleen suunnatut suunnitteluohjeet, jotka yleensä takaavat onnistuneen lopputuloksen (Fjelstad 2006, vi).

6.4 Johdinleveys ja -vahvuus

Johdinkerroksen paksuus vaikuttaa joustavan piirilevyn mekaanisiin sekä elektromagneettisiin ominaisuuksiin ja jonkin verran myös piirilevyn hintaan. Johtimen paksuudella ja leveydellä on suora vaikutus sen virrankuljetuskapasiteettiin. Tarvittavan johdinpaksuuden määrittämiseen on laadittu useita sääntöjä ja taulukoita. Stearnsin (1996, 33) esittämä yhtälö kuparijohtimille on $WTR = 6000$, missä W on johtimen leveys (mils), T paksuus (oz) ja R resistanssi ($m\Omega/ft$). Alla olevassa taulukossa (taulukko 2) on esitetty Fjelstadin (2006, 81) taulukkomalli, jossa on ilmoitettu maksimivirrat eri johdinpaksuuksille ja resistansseille 10 °C:n lämpötilan nousulla. Arvot on esitetty erikseen sekä 35 μm :n että 70 μm :n kuparivahvuuksille.

Taulukko 2. Poikkipinta-alaltaan suorakulmaisen kuparijohtimen virtakapasiteetit johdinleveyden mukaan (Fjelstad 2006, 81).

Johtimen leveys (mm)	35 μm kuparivahvuus		70 μm kuparivahvuus	
	I_{max} [A] (10 °C lämpötilan nousu)	R [m Ω /m]	I_{max} [A] (10 °C lämpötilan nousu)	R [m Ω /m]
0,13	0,25	390	-	-
0,25	0,6	195	1	98
0,38	1,1	122	1,8	61
0,51	1,3	98	2	49
0,64	1,5	76	2,5	38
0,76	1,8	61	2,9	30
1,27	2,5	37	4	18
1,78	3,2	27	5	14
2,54	4	18	6,9	9
3,81	5,9	12	9,8	6
5,08	6,9	9	12	5
6,35	8,6	8	13,5	4

Pienin käytettävä johdinleveys vaihtelee valmistustavan sekä piirilevytehtaan valmistuskyvyn mukaan. 250 μm (0.010") ja sitä leveämmät ovat vielä kohtalaiseen helposti toteutettavissa. Nykyään 125 μm (0,005") ja sitäkin ohuempia johtimet ovat jatkuvasti yleistymään päin, mutta alle 50 μm :n (0.002") johdinvetoihin kykeneviä tehtaita on melko rajallinen määrä. (Fjelstad 2006, 81.)

Syövyttämällä valmistettavien piirilevyjen johdinleveyteen sekä johdinväliin (*pitch*) vaikuttaa käytettävän metallifolion paksuus. 18 μm :n foliopaksuus sopii vielä 125 μm :n johdinväliin toteutukseen, mutta 35 μm :n foliosta on jo vaikeampi syövyttää johdinväliltään alle 175 μm :n kuvioita. Näissäkin valmistajakohtaiset erot ovat suuria ja niihin kannattaa tutustua. On olemassa piirilevyvalmistajia jotka valmistavat ongelmitta alle 25 μm :n johdinleveyksiä 18 μm :n kuparista. (Fjelstad 2006, 81–82.)

6.5 Rakenne ja materiaali

HOGA halutaan pitää koteloimattomana tuotteena. Tämä helpottaa piirilevyn suunnittelua. Kotelointi saattaa asettaa hyvinkin tarkat vaatimukset piirilevyn koolle ja asennustavalle. Näyttömoduulin jousto-ominaisuuksille ei ole määritelty tarkkoja erityisvaatimuksia. Tarkoitus on toteuttaa ohut näyttömoduuli, jota voi-

daan taivuttaa käyttäjän haluamaan asentoon. Näiden esitetietojen ja -vaatimusten mukaan HOGAn näyttömoduuli asettuu dynaamiseen sovelluskategoriaan.

Joustavan piirilevyn taivutussäteen tulisi olla mahdollisimman suuri ja taivutus- kulman puolestaan mahdollisimman pieni. Staattisissa sovelluksissa taivutussäde voi olla pienempi dynaamisiin sovelluksiin verrattuna. Minimisäteen pituuteen vaikuttaa sovellustyyppin lisäksi myös piirilevyn kokonaispaksuus. Alla olevan taulukon (Taulukko 3) avulla voidaan arvioida taivutussäteen minimiarvo.

Taulukko 3. Taivutussäteen määrittäminen kerrosrakenteen ja sovellustyyppin mukaan (Stearns 1996, 53, 55).

Rakenne	1-kerros	2-kerros	monikerros
Staattinen sovellus	3 x paksuus	10 x paksuus	50 x paksuus
Dynaaminen sovellus	24 x paksuus	48 x paksuus	-

Vaikka joustavuuteen ja kestävyysvaikuttavia tekijöitä korostetaan pääasiassa dynaamisten sovellusten suhteen, tulee samat asiat huomioida myös staattisissa sovelluskohteissa. Yleensä staattisiakin sovelluksia on taivutettava asennus- ja huoltotoimenpiteissä.

Kuten aiemmin todettiin, useampi kerrosmäärä rajaa käytettävän materiaalin polyimidiin. Piirilevyt on tarkoitus valmistaa Suomessa, jolloin polyimidi on ainoa vaihtoehto 2-kerroslevyn eristemateriaaliksi. Moduuli olisi voitu toteuttaa yksikerroksisenakin käyttämällä joustavia ja juotettavia johdinlevyjä, mutta tämän tyyppinen rakenne ei ole kovinkaan kestävä taivuttaa. Lisäksi kyseinen rakenne lisää ylimääräisiä vaiheita ladontaprosessiin. Myös polyimidi kiinnosti projektin osapuolia kaikkein eniten.

Rakennemäärittelyssä hyödynnettiin piirilevytehtaiden edustajien osaamista. HOGAn näyttömoduuli on toteutettu 2-kerrosrakenteella. Alun perin oli ajatuksena laminoida erillinen yksikerrosrakenne dynaamiselle johdinosuudelle, mutta tämän tyyppinen toteutus tulisi olemaan tarpeettoman kallis (Sivinen 2006). Sivisen mukaan tässä tapauksessa on järkevämpää toteuttaa 2-kerroksisen piirilevyn koko moduuli, jolloin ylimääräinen kuparikerros syövytetään valmistusprosessissa kokonaan pois.

Pintakerroksena on työssä käytetty valotettavaa flex-maskia. Menetelmä mahdollistaa erittäin ohuen pintakerroksen, jonka kohdistustarkkuus on hyvä. Tällä niin sanotulla fotomaskilla onnistuu johdinvetojen valmistus juotostäplien välistä ilman, että johtimesta ja pintakerroksesta muodostuva rakennepaksuus kasvaa liian suureksi. Liiallinen paksuus saattaisi johtaa tilanteeseen, jossa rakenne kannattaa komponenttia väärästä kohtaa nostaen komponentin jalat irti juotostäplistä. Tällöin juotos saattaa epäonnistua.

6.6 Suunnitteluohjelman valinta

HOGAn alkuperäinen versio v4.1 on dokumentoitu käyttäen Cadencen OrCAD-ohjelmistoa. Koska projektin tarkoituksena on kehittää jo valmista tuotetta, kannattaa alkuperäistä dokumentaatiota käyttää hyödyksi. Suunnitteluohjelmistoksi opinnäytteeseen valittiin myös OrCAD (v10.0), jotta vanhan version suunnittelu-dokumentaatiota voitaisiin hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. OrCAD:n käytöstä ei ollut aikaisempaa kokemusta, joten projektin alussa piti varata aikaa ohjelmiston käytön ja sen sisältämien ominaisuuksien opiskeluun.

Nykyaikaiset piirilevysuunnitteluohjelmistot tukevat 3D-suunnittelua, ja jotkut niistä sisältävät erityisesti joustavan piirilevyn suunnitteluun kehitettyjä erikoisominaisuuksia. Näissä ohjelmistoissa on pyritty ottamaan huomioon sähköisten ominaisuuksien lisäksi piirilevyn mekaaniset taivutusominaisuudet. OrCAD on melko perinteisiä linjoja noudatteleva 2D-ohjelmisto, joka vaikuttaa toimivalta työkalulta. Ohjelmisto ei sisällä mitään erityisominaisuuksia joustaville piirilevyille, mutta sillä tulee toimeen aivan yhtä hyvin kuin muillakin perinteisillä 2D-ohjelmilla.

6.7 Piirilevyn muoto

Ensimmäiseksi tulee suunnitella piirilevyn muoto. Tämä on joustavan piirilevysuunnittelun yksi haastavimmista tehtävistä. Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, suunnitteluun on nykyään tarjolla valmiita 3D CAD-komponentteja.

Jotkin joustavista eristemateriaaleista ovat erittäin helposti repeytyviä. Piirilevyn repeytymistä voidaan ehkäistä muotosuunnittelulla. Pyöreät muodot toimivat parhaiten. Jos on tarve käyttää teräviä kulmia, repeytymistä voidaan ehkäistä tekemällä kulmaan reikä (engl. *tear-stop hole*) joko poraamalla tai rei'ittämällä. Myös ylimääräiset johdinkerrokset estävät repeytymisen melko tehokkaasti tällaisissa kohdissa. Asennusreikien ympärille tulisi aina jättää johdinmateriaalia vahvistamaan rakennetta. (Stearns 1996, 61.)

Vaikka pyöristetyt muodot tekevät piirilevystä kestävä, HOGAn toteutukseen valittiin kulmikkaat ääriviivat. Valinta perustuu helpompaan toteutukseen, sillä pyöreät muodot vaativat periaatteessa äärettömän määrän koordinaatteja. Myös johdinvetojen tulisi noudattaa piirilevyn äärimuotoja. Tällöin saavutetaan pienempi pakkaustiheys.

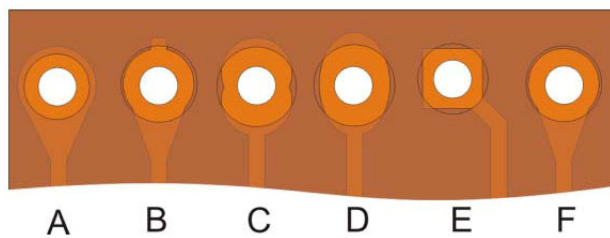
6.8 Komponenttien sijoittaminen

Joustavissa piirilevyissä komponentteja ei tulisi sijoittaa taivutuksille altistuviin piirilevyosuuksiin. Komponenttiosuudet kannattaa jäykistää vahvikkeella aina kun on mahdollista. Vahvike lisää kestävyttä ja helpottaa komponenttien ladontaa. Jos komponenttialueen vahvike on hyvin suunniteltu, erillistä jigia ei välttämättä tarvita ollenkaan.

HOGAn tuotekehittelyn alkuvaiheilla oli jo selvillä, mitkä komponentit sijoitetaan joustavalle piirilevyosuudelle. Tutkimuksen yhtenä kohteena on SMD-komponenttien juotoksen pitävyys joustavalla alustalla, joten ledien ja vastusten alle ei ole valmistettu minkäänlaisia vahvikkeita. Vahvikerakenne on määritelty ainoastaan ZIF-liittimelle tulevien kontaktipintojen alle. Silkkipainokerrokseen (engl. *silk screen top*) on määritelty omat kohdistusmerkinnät helpottamaan vahvikkeen asentamista. HOGAn näyttömoduulin silkkipainatus jäi piirilevytehtaalla jostakin syystä valmistamatta.

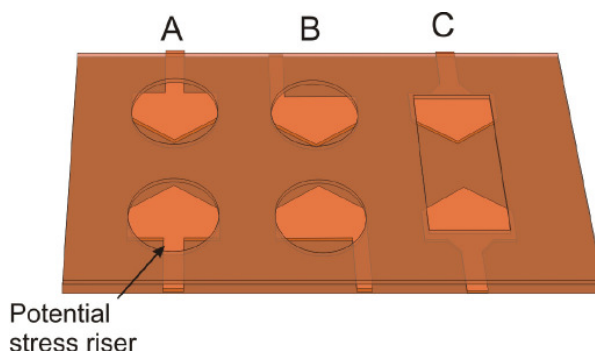
6.9 Juotostäplät, pädit ja johtavat läpiviennit

Juotostäplät ja läpiviennit tulisi ankkuroida pintakerroksen alle kuvan 6 esittämällä tavalla. Kuvassa 8 on esitetty ankkuroitavia juotostäplämalleja SMD-komponenteille. Ankkurointi estää johdinkerroksen irtoamisen joustavasta eristemateriaalista. Ankkurointi on kannattavinta jyrkille taivutuksille altistuvilla piirilevyosuuksilla. Itse juotostäplän tulisi olla muodoltaan symmetrinen, sillä epäsymmetrisyys saattaa aiheuttaa vääntyilyä ja rasisitusvoimien epätasaista jakautumista (Gilleo 2001, 188).



Kuva 6. Pintakerroksen alle ankkuroitavat läpiviennit (Fjelstad 2006, 88).

Kohtiin, joissa johdinvedot yhtyvät juotostäpliin tai läpivienteihin, tulee kiinnittää huomiota. Suositeltava täplämuoto on niin sanottu kyyneltippa (engl. *teardrop*), jossa yhtymäkohtaan on lisätty täytteet (engl. *filleting*). Muoto muistuttaa pisaraa ja vähentää johtimiin kohdistuvaa pistemäistä rasisitusta. Kyyneltippamuoto on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Pintakerroksen alle ankkuroitavia juotosalue-esimerkkejä SMD-komponenteille (Fjelstad 2006, 88).

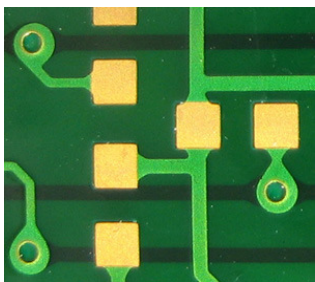
Johtavia läpivientejä käytetään kaksi- ja monikerroslevyissä sekä langallisten komponenttien kanssa. Monikerroslevyn läpivienti yhdistää kaksi tai useampaa johdinkerrosta toisiinsa. Johtavien läpivientien käyttöä tulee välttää taipuvilla pii-

rilevyalueilla, sillä näihin muodostuu melko suuria rasituksia. Tarve johtaville läpiviennille saattaa olla väistämätön. Tällöin pädin halkaisijan tulee olla n. 2–2,5 kertaa reiän halkaisijaa (D) suurempi. Edellä esitetyt mittasuhteet on merkitty kuvaan 7.



Kuva 8. Suositeltava reiän koko suhteessa pädin kokoon (Fjelstad 2006, 86).

Jos suunnitteluohjelmisto ei sisällä mahdollisuutta kyyneltippamuodoille tai muille täytetyypeille, ne voidaan valmistaa myös jälkikäteen Gerber-tiedostoja muokkaamalla. OrCAD-ohjelmisto sisältää tähän tarkoitukseen erillisen GerbTool-ohjelman, jonka työkaluilla onnistuu myös ohjattu kyyneltippamuotojen valmistus. Kuvassa 9 on esitetty suurennos HOGAn juotostäplistä. Nämä täplämuodot on toteutettu GerbToolin Teardrop-työkalun avulla.



Kuva 9. Kyyneltipat ja täytteet johdinkerroksen muodoissa lisäävät piirilevyn taivutuskestoa.

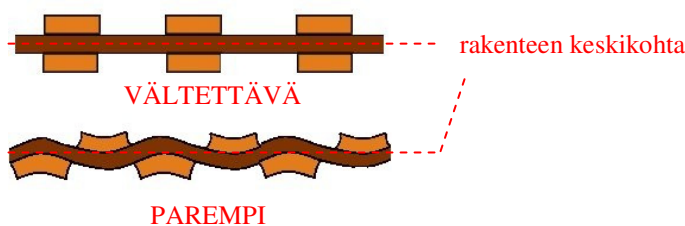
6.10 Johdinvedot

Joustavissa piirilevyissä johdinvetojen reitittämiseen (engl. *routing*) tulee käyttää enemmän aikaa verrattuna jäykän piirilevyn suunnitteluun. Reitittämisellä on hyvin suuri merkitys piirilevyn kestävyteen. Hyvin toteutunut reititys minimoi riskin johdinkatkosten syntymiseen.

Dynaamisille sovelluksille, joiden taivutussäde on pieni tai niihin kohdistuu hyvin suuri määrä taivutuskertoja, kannattaa suosia yksikerrosrakennetta. Tavoitteena on

saada johdinkerros sijoitettua mahdollisimman keskelle laminointirakennetta, jolloin taivutusten aiheuttamat rasitusvoimat pysyvät alhaisina.

Jos johdinkerroksia tarvitaan kuitenkin kaksi tai jopa enemmän, tulee päällekkäiset johtimet lomittaa kuvassa 10 esitetyn rakenteen mukaisesti (kuvan alempi rakennemalli). Lomitettu rakenne pyrkii asettamaan johtimet mahdollisimman lähelle rakenteen keskikohtaa. (Stearns 1996, 53, 55.)

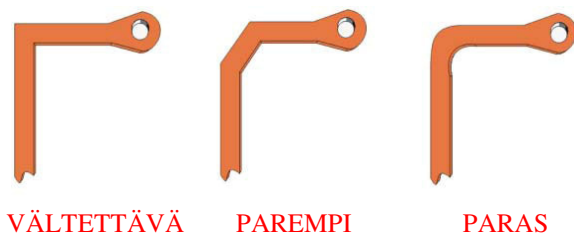


Kuva 10. Poikkileikkaus kaksikerrosrakenteesta.

Taipuvissa alueissa johtimien tulee kulkea siten, että ne ovat suorassa kulmassa flexin taivutusakseliin nähden. Jos johdinfolion työstösuunta on tiedossa, tulee myös työstösuunnan olla kohtisuorassa taivutusakseliin nähden. Taivutusalueella vedot kannattaa mitoittaa mahdollisimman leveiksi tukemaan rakennetta ja lisäämään taivutuskestoa. Taivutuskohdissa ei johdinleveyttä kannata muuttaa ja yhtymäkohtia (x- ja t-liitokset) tulee välttää. (All Flex, 8; Stearns 1996, 54.)

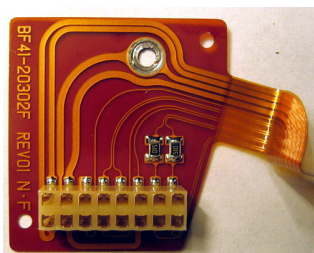
Taipuvat johdinosuudet tulee sijaita mahdollisimman kaukana liittimistä, vahvikkeista tai mekaanisista kiinnityksistä. Taipuvan osuuden etäisyys liittimistä ja PTH-komponenteista tulee olla vähintään 3 mm. Lisäksi taivutusosuuksilla tulee suosia leveitä ja ohuita johtimia. Ne on helppo valmistaa ja johtavat hyvin virtaa. (Stearns 1996, 54.)

CAD-ohjelmistojen automaattiset reititysohjelmat eivät osaa lajitella johtimia virtapiirien ominaisuuksien mukaan. Tällaisia ovat mm. häiriöherkät johdinsignaalit ja niiden suojaus. Ne eivät myöskään osaa erotella leveämpiä johtimia vaativia tehonsyöttölinjoja, joiden sijainti on valittava piirilevyn rakenteen, valmistettavuuden sekä taipuvuuden määräämällä tavalla. Edellä esitetyn perusteella joustavat piirilevyt kannattaa reitittää manuaalisesti.



Kuva 11. Suunnittelussa tulee välttää teräväkulmaisia johdin vetoja. (Fjelstad 2006, 83.)

Johtimet tulee kulkea piirilevyllä siten, että kaikki kulmat ja mutkat ovat tylppiä ($>90^\circ$) kuvan 11 mukaisesti. Tämä tulee huomioida varsinkin dynaamisten sovellusten taivutusalueilla. Suunnitteluohjelman asetuksista kannattaa valita vähintään 45° :n johdinvetokulmat. Optimaalinen lopputulos saadaan käyttämällä pyöreitä vetoja. Kuvassa 12 on malliesimerkki piirilevystä, jossa on käytetty radiaalisia johdin vetoja.



Kuva 12. Paras lopputulos saavutetaan käyttämällä radiaalisia johdin vetoja.

6.11 Kohdistusmerkit

Viimeistään komponenttien ladonnassa tarvitaan kohdistusmerkkejä (engl. *fiducials*). Kohdistusmerkit sijaitsevat piirilevyn pinnassa, ja ne voivat olla joko paikallisia, globaaleja tai paneelikehykseen liitettyjä. Kohdistusmerkkejä saatetaan käyttää myös joustavan piirilevyn irrottamistyökalun kohdistamisessa. Paikallisia kohdistusmerkkejä käytetään yleensä erittäin tarkkaa kohdistustarkkuutta vaativien komponenttien kohdistamiseen. Globaalit kohdistusmerkit ovat kaikkein yleisimmin käytettyjä, ja niiden avulla kohdistetaan suurin osa piirilevyn komponenteista. Globaaleja kohdistusmerkkejä olisi hyvä olla vähintään kolme aina yhtä piirilevyä kohden. Kohdistusmerkkejä on hyvä sijoittaa myös paneelien kehyksiin.

Kohdistusmerkkien muotoa ei ole standardoitu, sillä mitään yleispätevää muotoa ei ole olemassa. Suosittuja kohdistusmerkkimalleja ovat ”risuaidat”, tähdet ja pallo. Suunnittelijan täytyy olla tietoinen tuotantolinjan konenäköjärjestelmän kohdistusmerkeille asettamista vaatimuksista. Muodon lisäksi on huomioitava johdinkerroksen pinnoituksessa käytettävä materiaali. Laite, joka lukee hyvin kuparisen kohdistusmerkin, ei välttämättä kykene löytämään kultapinnoitettua merkkiä. Joustavien piirilevyjen kohdistusongelma syntyy yleensä pinnan epätasaisuudesta. Kohdistusmerkkien luettavuus on tärkeä seikka piirilevyn kokoonpanossa. Yleensä prosessi keskeytetään, jos laitteisto havaitsee kohdistusvirheen (Gilleo 2001, 185–186.)

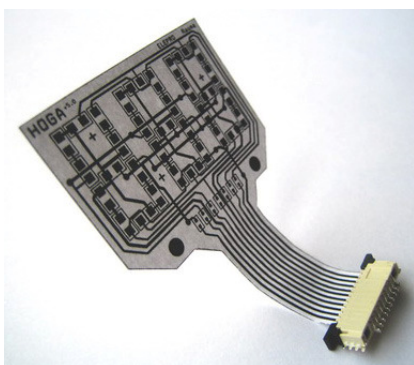
Paras tarkkuus saavutetaan, kun kohdistusmerkit on sijoitettu piirilevyn ääri-laidoille mahdollisimman etäälle toisistaan. Joustavat piirilevyt ovat monesti muodoiltaan pitkiä ja ohuita, joten levyillä on taipumus vääntyillä. Asiaan vaikuttaa myös se, että joustavien piirilevyjen materiaalit ovat yleensä niin sanottua rullatavaraa, jolloin materiaalin muodossa esiintyy ”muistia”. Materiaalista ja säilytysajasta riippuen muotomuisti voi olla hyvinkin voimakasta. Taipuneet suikalemaiset levyt muodostavat epätasaisia pintoja, joita on vaikea kohdistaa. Tämän tyyppisissä levyissä kohdistusmerkkejä tarvitaan normaalia enemmän ja niiden paikat tulee valita huolella.

HOGAn näyttömoduuliin valittiin kohdistusmerkiksi 1 mm:n ympyrä 2 mm:n pintakerrosavauksella. Elepron henkilökunta on todennut kyseisen muodon soveltuvan parhaiten koulutustehtaan laitteiston kanssa.

6.12 Prototyypit ja mallit

Prototyyppi kannattaa valmistaa aina kun on mahdollista. Prototyypin valmistus ja sen testaus auttavat vähentämään suunnitteluvirheitä lopputuotteessa. Vaikka yksittäisen prototyypin valmistaminen joustavalle piirilevyille on kallista, se monesti maksaa itsensä takaisin.

Fjelstad (2006, 75–76), Gilleo (2001, 119) ja Stearns (1996, 34) kannustavat käyttämään paperimallia (engl. *paper doll, mockup*). Malli toteutetaan tulostamalla piirilevy paperille ja leikkaamalla se ääri viivoja pitkin irti. Tämä helppo ja yksinkertainen malli auttaa suunnittelijaa havaitsemaan monet virheet jo varhaisessa vaiheessa. Tällöin säästyy suuri määrä resursseja, sillä testaus ja virheiden korjaaminen ovat monesti suunnittelun työläimmät vaiheet. Kuva paperimallista on esitetty alla (Kuva 13).



Kuva 13. HOGAn näyttömoduulin paperimalli ZIF-liittimeen sovitettuna.

Uudesta HOGA-versiosta päätettiin jättää prototyyppi kokonaan valmistamatta, sillä laitteen sähköiseen toimintaan ei ole tarkoitus tehdä mitään muutoksia, ja toimiva laiteversio on jo olemassa. Mahdollisten virheiden katsotaan olevan suuruusluokaltaan niin pieniä, etteivät ne vaikuta tutkimusten etenemiseen. Tutkimukset keskittyvät lähinnä mekaanisiin testeihin.

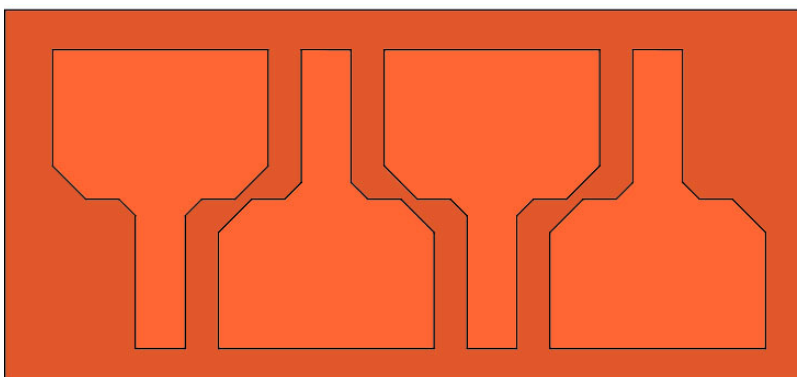
HOGAn joustavasta piirilevystä valmistettiin paperimalleja. Niiden käyttö antoi lisäarvoa suunnitteluun, sillä OrCAD ei sisällä minkäänlaisia 3D-ominaisuuksia. Malleilla varmistettiin piirilevyn mitat sopiviksi.

6.13 Panelointi

Paneeli on usean piirilevyn muodostama kehystetty kokonaisuus, jonka tarkoituksena on helpottaa käsittelyä sekä parantaa yksittäisen piirilevyn läpimenoaikaa. Panelointi kannattaa huomioida jo piirilevyn rakenteen suunnittelussa, jolloin piirilevyn muoto sekä jäykisteiden paikat saadaan sovitettua paneloinnin kanssa so-

piviksi. Joissakin tapauksissa on hyvä ottaa huomioon myös materiaalien koneistussuunta. Myös tässä vaiheessa yhteistyö eri osapuolien kesken on oltava saumatonta. Paneloinnin on täytettävä piirilevyvalmistukseen sekä kokoonpanoon asetetut vaatimukset. (Fjelstad 2006, 69.)

Hyvin toteutetulla sijoittelulla voidaan saavuttaa huomattavia materiaalisäästöjä, sillä joustavat piirilevy materiaalit ovat yleensä kalliita verrattuna FR4:ään. Alla on esitetty alustava suunnitelma HOGAn näyttömoduulin paneloinnista (Kuva 14).



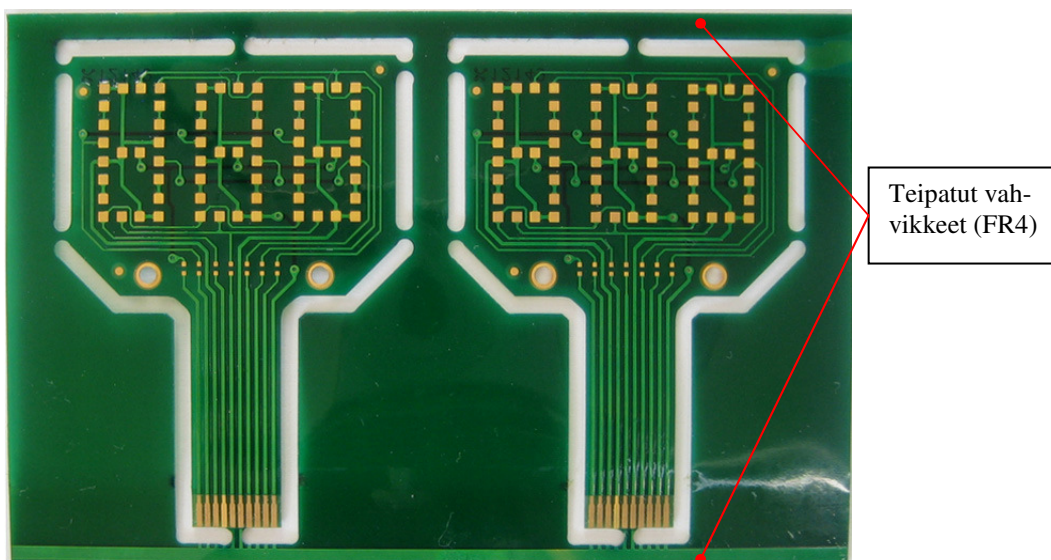
Kuva 14. Hyvin toteutettu panelointi vähentää materiaalihukkaa ja siten myös kokonaiskustannuksia.

Piirilevyvalmistajan paneloivat usein joustavat piirilevyt. Tehtailla on omat työkalut panelointiin ja tarkka tieto siitä, mihin tuotantolaitteet kykenevät. Aihio koot vaihtelevat, ja valmistaja voi itse määrittää paneelin koon käytettävälle aihiolle sopivaksi.

Paneloinnin voi myös toteuttaa itse. Oma panelointidokumentti nopeuttaa stensiilien tilaamista. Tällöin suunnittelu ei ole riippuvainen piirilevyvalmistajan tuottamasta dokumentaatiosta ja laatu on varmistettu myös seuraavia tuote-eriä ajatellen. Esimerkkinä mainittakoon tapaus, jossa puutteellinen panelointidokumentaatio aiheutti väärät mittasuhteet toiselta valmistajalta tilattuun piirilevyerään. Aiemmin valmistettua stensiiliä ei voitu käyttää kyseisten levyjen kokoonpanossa, vaan oli tilattava uusi stensiili.

Orcad-ohjelmistoon kuuluva GerbTool-työkalu on paneloinnin suhteen melko hankala. Panelointi onnistuu ainoastaan asettamalla piirilevyt samansuuntaisesti. HOGAn näyttömoduulin muodoille tällainen asettelu ei ole tilankäytöltä optimaalinen.

Panelointivaiheessa piirilevyjen valmistaja ei ollut vielä tiedossa ja aihoiden koon vaihtelu eri valmistajien kesken osoittautui ongelmalliseksi. Tästä syystä HOGAn joustavan piirilevyn panelointi päätettiin jättää piirilevyvalmistajan tehtäväksi. Tilausmäärittelyssä esitettiin ehdotus piirilevyjen asetteluun kuvan 14 mukaisesti. Tilausmäärittelystä huolimatta piirilevyvalmistajan toteuttama panelointiratkaisu ei ollut materiaalisäästön kannalta kaikkein paras mahdollinen. Tehtaan toimittama piirilevypaneeli on esitetty kuvassa 15. Piirilevyvalmistajan tekemään ratkaisuun on saattanut vaikuttaa liitinpään vahvike, joka on toteutettu tilausmäärittelyn mukaan liimaamalla FR4-levy 2-puoleisella teipillä piirilevyn taakse. Vaikuttaa siltä, että vahvike on liimattu ennen piirilevyjen ulkomittojen jyrshintää, jolloin vahvikemateriaalia jää myös kehyksiin samalla vahvistaen paneelin rakennetta. Vahvikeliuskat sijaitsevat sekä paneelin ylä- että alaosassa (ks. kuva 15).

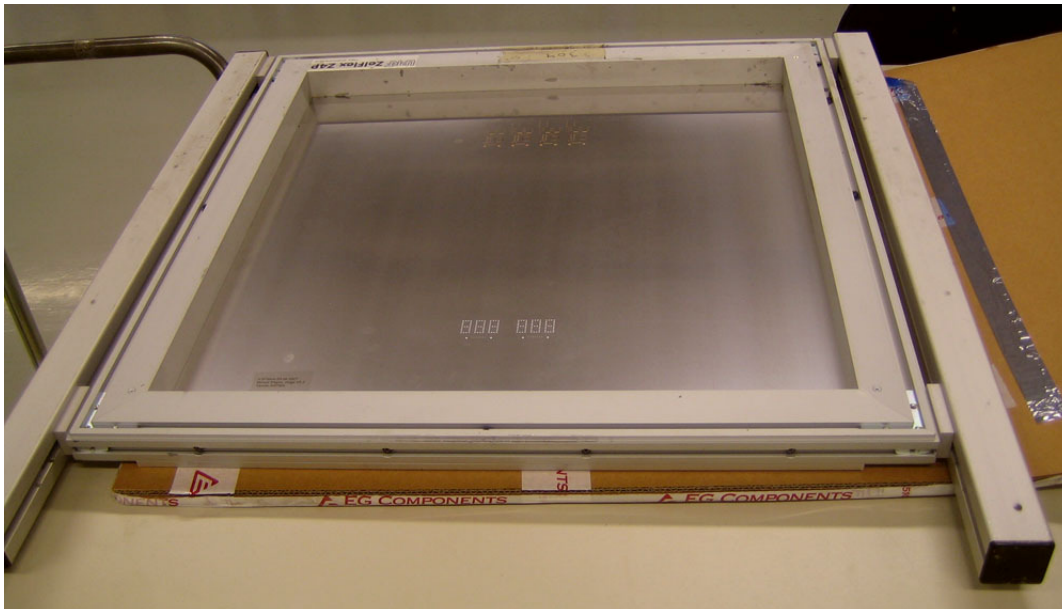


Kuva 15. HOGAn joustava piirilevypaneeli.

6.14 Stensiili

Stensiili on reikälevy, jonka läpi juotospasta tai liima painetaan piirilevyn pintaan kokoonpanovaiheessa. Stensiilin reikien tulisi olla piirilevyn pädejä pienempiä. Levyn ja stensiilin kohdistus ei ole aivan absoluuttisen tarkkaa, ja juotospasta tai liimaa voi painettaessa tunkeutua myös stensiilin ja levyn väliin. Tässä työssä stensiilin avaukset määriteltiin Elepron toimesta 10 %:n pienennyksellä, jolloin stensiilin reiät ovat 10 % piirilevyn pädejä pienemmät. Samaan stensiilipeltiin päätettiin valmistaa HOGAn joustavan sekä FR4-piirilevyjen reiät. Stensiilin paksuus oli valittava molemmille piirilevyille sopivaksi. Elepron toimesta paksuudeksi valittiin 75 µm.

Stensiilin valmistustiedostot teetettiin piirilevyvalmistajalla, jolloin stensiilistä tulee yhtenevä paneelin kanssa. Stensiilin valmistuksessa on erilaisia tapoja, joista yleisimpiä ovat laserleikkaus ja etsaus. Tässä työssä käytettiin laserleikkausmenetelmää.



Kuva 16. Stensiili pneumaattisesti kiristyvässä kehyksessä.

7 KOKOONPANO

7.1 Yleistä kokoonpanosta

Tässä luvussa selostetaan lyhyesti joustavan piirilevyn kokoonpanoon liittyvät asiat, jotka todettiin HOGAn ensimmäisessä kokoonpanossa. Luvun on tarkoitus tukea suunnitteluluvussa esitettyä teoriaa. Kyseessä on Elepron ensimmäinen joustavan piirilevyn kokoonpano. Ensimmäisessä kokoonpanossa ei vielä käytetty johtavaa liimaa vaan kokoonpano suoritettiin käyttämällä RoHS-direktiivin mukaista juotospastaa. Luvussa esitetyistä asioista toivotaan olevan hyötyä yrityksille ja elektroniikkasuunnittelijoille, jotka ovat aloittamassa joustavan piirilevyn suunnittelua tai kokoonpanoa. Kappaleessa ei ole pyritty selvittämään kokoonpanon eri vaiheita kovinkaan yksiselkoisesti, vaan perinteisen kokoonpanoprosessin oletetaan olevan lukijalle jo ennestään tuttu.

7.2 Jigin käyttö

Yksi ongelmallisimmista asioista joustavan piirilevyn valmistuksessa on piirilevyn kuljettaminen kokoonpanolinjan läpi. Joustava piirilevy vaatii jonkinlaisen alustan tukemaan sitä koko tuotantoprosessin ajan. Tähän tarkoitukseen kannattaa valmistaa tuotekohtainen jigi, jolla tuetaan levyä koko kokoonpanoprosessin ajan. Suurin tarve jigin käyttöön esiintyy pastan painossa sekä komponenttien ladonnassa. Jos jigiä käytetään myös juotosprosessissa, se ei saa estää lämmön tasaista jakautumista. Epätasainen lämpöjakautuma voi vahingoittaa piirilevyn rakennetta, tai se saattaa johtaa juotosprosessin epäonnistumiseen. Jigin tulisi myös kestää useamman kuin yhden läpimenosyklin.

HOGAn näyttömoduulin ensimmäisessä kokoonpanossa jiginä käytettiin FR4-levyä. FR4:sta valmistettuun jigialustaan joustava piirilevypaneeli kiinnitettiin polyimiditeipillä, joka valittiin reflow-juotosprosessin vaatiman lämpötilakeston vuoksi. Kyseinen alustaratkaisu soveltuu käytettäväksi läpi koko tuotantolinjan.

Testikokoonpanossa jigä jouduttiin työstämään piirilevyyden kiinnitettyjen vahvikkeiden kohdalta. Paneelin alapinnan vahvikeliuskat nostavat piirilevyä, jolloin piirilevy ei puristu tarpeeksi tiiviisti stensiilin pintaan. Jigiin oli työstettävä sopivat urat vahvikeliuskosten alle, jolloin vahvikkeiden kerrospaksuuden tuottamasta ongelmasta päästiin eroon.

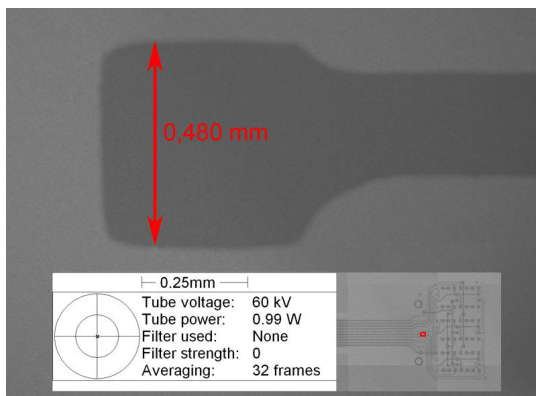
Jigin urituksilla saavutettiin myös toinen etu. Kun piirilevyn vahvikkeet asetettiin niille tarkoitettuihin uriin, paneeli pingottui suoraksi. Pastan painossa ja komponenttien ladonnassa päästään parempiin kohdistustarkkuuksiin, kun piirilevyn pinta on suora ja tiiviisti kiinni jigissä.

7.3 Juotteen painaminen

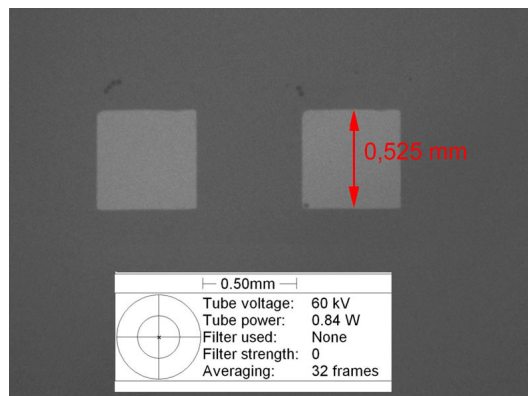
Pastan ja liiman painossa käytettiin 75 µm:n vahvuista stensiiliä 10 % pienennetyillä laserleikatuilla rei'illä. Ensimmäinen kokoonpanoerä suoritettiin käyttämällä RoHS-yhteensopivaa juotospastaa. Kokoonpano onnistui, ja valmiit näyttömoduulit todettiin lopuksi toimiviksi.

Paras tulos saavutettiin käyttämällä 4 kg:n suuruista raakkelpainetta (paine raakkelin ja stensiilin välillä). Raakkelin paksuus oli 0,2 mm, ja käytetyt vetonopeudet vaihtelivat 20–100 mm/s välillä. Tässä esitetyt arvot todettiin sopiviksi.

Isotrooppisen liiman käytössä stensiilin liiallinen paksuus aiheutti ongelmia. Painettu liima pursui ladonnassa 0402 vastusten alla oikosulkien vastuksen kontaktit. Muissa piirilevyn kohdissa liima levisi juotostäplän vieressä olevan pintakerroksen päälle. Arvio isotrooppisen liiman käyttöön sopivaksi stensiilipaksuudeksi on noin 50 µm. Jälkikäteen suoritetuissa mittauksissa havaittiin piirilevyn päiden halkaisijan olevan stensiilin reikiä 0,045 mm pienemmät. Kokoero pitäisi olla päinvastainen. Johtopäätöksenä stensiilin liian suuri vahvuus yhdessä avausten ylisuurien koon kanssa aiheuttaa liiman leviämisen päiden ulkopuolelle aiheuttaen oikosulkuja pienillä johdinväleillä. Elepron röntgenkameralla otetut mittauskuvat piirilevystä ja stensiilistä on esitetty alla olevissa kuvissa.



Kuva 18. Röntgenkuva 0402-vastuksen pädistä joustavalla piirilevyllä (Innova Elepro).



Kuva 17. Röntgenkuva 0402-vastuksen avauksesta stensiilillä (Innova Elepro).

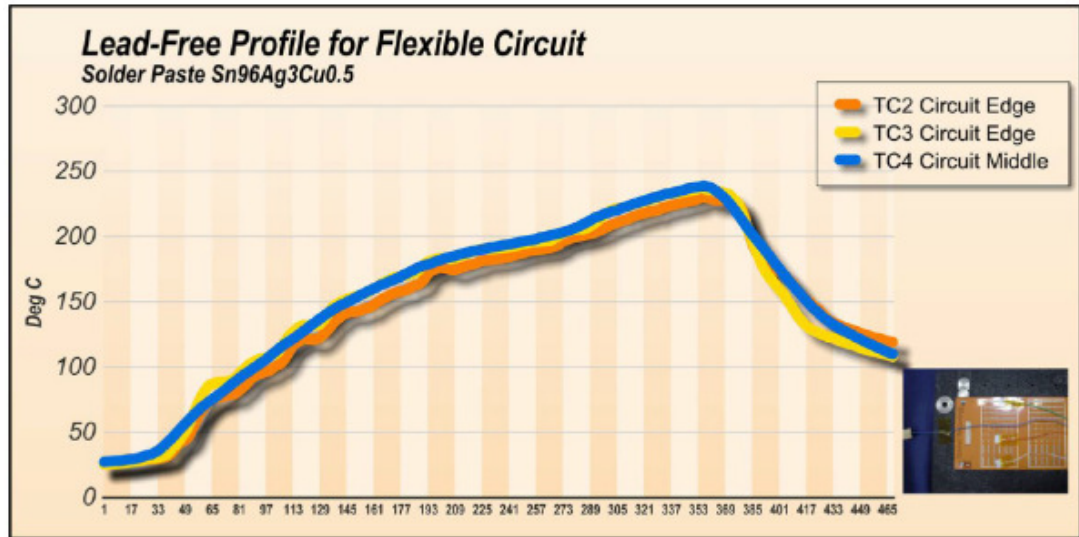
7.4 Komponenttien ladonta

Paneelin keskiosan taipuminen irti alustasta havaittiin vaikuttavan komponenttien kohdistustarkkuuteen heikentävästi. Suurilla valmistusvolyymeilla ja pienillä komponenteilla poikkeamat saattavat muodostua ongelmallisiksi. Tukevan jigin käyttö on kannattavaa. Kuten aiemmin on korostettu, jigin rakenne ja sen käyttö kannattaa huomioida jo piirilevyn suunnitteluvaiheessa.

Muilta osin komponenttien ladonnassa ei ilmennyt ongelmia. Silloin kun joustava piirilevy tuetaan jigin avulla mahdollisimman hyvin, ei joustavan piirilevyn ladonta juurikaan eroa perinteisestä.

7.5 Juotosprosessi

Joustavan piirilevyn juotoslämpötilan profiloinnissa on oltava tarkkana, sillä ohut ja kevyt materiaali reagoi nopeasti lämpötilamuutoksiin. Sopiva juotoslämpötilaprofiili lyijyttömälle juotteelle on esitetty alla kuvassa 19. (Fjelstad 2006, 160).



Kuva 19. Lyijyttömän juotteen juotoslämpötilaprofiili käytettäessä kuljetusalustaa joustavan piirilevyn kokoonpanossa (Fjelstad 2006, 160).

Matalan sulamispisteen omaavien eristemateriaalien kanssa voidaan käyttää esimerkiksi indium-tinaa (IN52Sn48 [sulamispiste 117°]) sekä vismutti-tinaa (Bi57Sn43 [sulamispiste 138°]). (Fjelstad 2006, 160.)

8 PARANNUSEHDOTUKSET

Seuraavia tuote-eriä varten on tarkoitus teettää uusi stensiili 0.50 μm :n vahvuudella. Tavoitteena on saavuttaa ohuempi liimakerros ja välttää oikosulut vastusten (0402) alla. Stensiilin reikien kokoa pienennetään vielä nykyisestä 10 prosenttiyksikköä. Myös reikien pienennys vähentää painossa piirilevyn pintaan jäävän liiman määrää.

Kunnollisen jigien suunnitteluun ja valmistamiseen kannattaa panostaa. Tarttuvaa silikonipohjaista ratkaisua käyttävä alusta voisi olla tämän tyyppisessä tuotteessa toimiva. Silikonia hyödyntäviä jigijä on saatavilla muutamia malleja. Toinen vaihtoehto olisi lisätä jäykisteet paneelin kehysosiin, jolloin paneloitu piirilevy muistuttaisi flex-rigid-rakennetta. Vahvikemateriaalina voisi käyttää esimerkiksi FR4:ää. Tällöin paneeli voidaan asettaa suoraan tuotantolinjan kuljettimelle ilman erillistä jigijä. Pastan tai liiman painossa saatetaan silti tarvita lisätukea komponenttialueen alle.

Kun ladonnassa esiintyvät ongelmat on saatu korjattua, voidaan tutkittaville piirilevyille suorittaa sää- ja taivutustestit. Analysoimalla hyvin suunnitellut ja dokumentoidut testit saadaan luotettavaa sisältöä johtopäätöksiin isotrooppisten liimojen käytöstä yhdessä joustavan piirilevyn kanssa.

Neljällä AA-paristolla toteutettu virtalähde on laitteelle melko suuri sekä kooltaan että kapasiteetiltaan. Paristojen määrän vähentäminen sekä samalla myös käyttäjännitteen alentaminen olisi mahdollista, jos sarjaan kytketyt ledit kytkettäisiinkin rinnan.

9 YHTEENVETO

Ohjelmistotyökalun valinta on syytä tehdä huolella, jotta joustavan piirilevyn tuomia etuja voitaisiin hyödyntää mahdollisimman hyvin. Valmistustiedostojen (Gerber) muokkaaminen joustavalle piirilevyille sopivaksi onnistuu erillisillä ohjelmilla, mutta tämä lisää tiedostojen määrää ja hankaloittaa versionhallintaa.

Cadencen ohjelmistossa pädien muotoilu sekä piirilevyjen panelointi onnistuu erillisen GerbTool-ohjelmiston työkalujen avulla. Kyseinen ohjelma mahdollistaa muokkaukset ainoastaan piirilevyn Gerber-tiedostoille. Tämä aiheuttaa sen, että piirikaavion tehtyjä muutoksia ei voi päivittää panelointitiedostoon, vaan panelointi on tehtävä uudelleen. Menetelmällä tulee toimeen, mutta sitä ei voi suositella huonon versiohallittavuuden vuoksi.

Ohjelmistotyökalun huonosta soveltuvuudesta sekä kokonpanossa esiintyvistä ongelmista huolimatta tämä opinnäytetyö on osoittanut sen, että elektroniikkasuunnittelijan on lyhyen perehtymisen jälkeen helppo siirtyä perinteisestä (FR4) piirilevystä joustavan piirilevyn käyttöön. Yksinkertaisimmillaan joustava piirilevytekniikka sisältää vain muutamia tuntemattomia termejä sekä uusia suunnittelu-sääntöjä.

Materiaalitekniikan osuutta joustavan piirilevyn suunnittelussa ei voi vähätellä. Elektronisten sekä mekaanisten ominaisuuksien lisäksi käytettävä materiaali määrää ne parametrit, joita elektroniikkasuunnittelijan tulee noudattaa. Tästä johtuen materiaali-, mekaniikka- ja elektroniikkaosaajien tulee tehdä tiivistä yhteistyötä, ellei suunnittelija itse tunne kaikkia osaamisalueita tarvituin edellytyksin. Jos jokin tekniikan osa-alueista on vieras, voidaan hyödyntää kokeneen piirilevyvalmistajan osaamista.

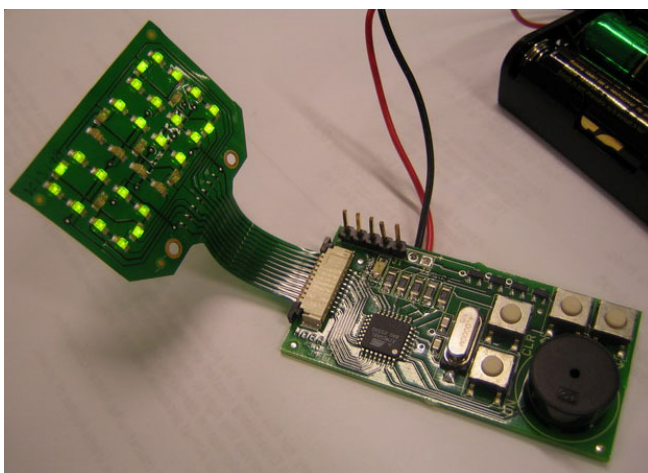
Pakkaustekniikan kehitys elektroniikkateollisuudessa on ollut pinnalla jo jonkin aikaa. Yleinen trendi on ollut siirtyminen kohti 3D-kotelointia. Pinoamalla komponentit (sirut) päällekkäin saavutetaan jopa yli sadan prosentin parannus pinta-

alasuhteeseen. Nykyisistä 3D-teknikoista mainittakoon Stacked wirebonded, Package on Package (POP), Folded Chips on Flex ja 3D-Plus. (Collander 2007.)

Joustavaa piirilevytekniikkaa kehitetään jatkuvasti. Fjelstadin (2006, 8) mukaan on vaikea ennustaa, mihin suuntaan ollaan menossa. Todennäköisesti roll-to-roll-prosessi tulee esittämään hyvin tärkeää roolia. Fjelstadin ennustusta tukee se, että roll-to-roll-valmistusmenetelmää käsiteltiin erillisenä seminaarina Oulussa pidetyssä EMPC 2007 -tapahtumassa (*European Microelectronics and Packaging Conference*). Kyseessä on joka toinen vuosi järjestettävä IMAPS Europe -yhteisön kokous (*International Microelectronics And Packaging Society*).

Joustavaa materiaalia on hyödynnetty myös erilaisissa taipuvissa näyttöratkaisuis-
sa. Esimerkkinä orgaanisiin valoa emittoiviin diodeihin (OLED, Organic LED) perustuvat taivuteltavat näytöt. Taipuvien OLED-näyttöjen suurin haaste on ollut niiden valmistuksessa, sillä orgaanisella rakenteella on huono lämpötilankesto. Sovelluskohteita ohuelle taipuvalle näytölle löytyy laajalti.

Valmis koulutustuote HOGA v5.0 on esitetty kuvassa 20. Komponentit on juotettu käyttämällä RoHS-yhteensopivaa tinapastaa. Kuvassa vasemmalla näkyy joustava näyttömoduuli sekä oikealla jäykkä FR4-piirilevy. Piirilevyt on kytketty toisiinsa ZIF-liittimen avulla.



Kuva 20. Innova Elepron valmis koulutustuote HOGA v5.0.

LÄHTEET

All Flex Inc. N. 2004. Design Guide: Perfecting Customer Service [verkkodokumentti]. [Viitattu 4.7.2007]. Saatavissa: <http://www.allflexinc.com/Includes/Documents/AllFlexDesignGuide.pdf>.

Collander, P. 2007. Piirit pinoon ja pakettiin. Prosessori 6–7/2007, s. 30–32.

Fjelstad, J. 2006. Flexible Circuit Technology. Seaside. BR Publishing.

Gilleo, K. 2001. Flexible Circuits. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Harper, C. 1997. Electronic Packaging and Interconnection Handbook. New York: McGraw-Hill.

Herrmann, G. & Engerer, K. 1992. Handbook of printed circuit technology. Port Erin: Electrochemical Publications Limited.

IPC-2223A, 1. Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards. Flexible Circuits Design Subcommittee of the Flexible Circuits Committee of IPC. 2004.

Jawitz, M. 1997. Printed Circuit Board Materials Handbook. Tokio. McGraw-Hill.

Kivikunnas, J. 2006. CADMIC Oy. Jyväskylä. Puhelinhaastattelu 5.12.2006. Haastattelijana Jyri Mäntysalo. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Lenthor Engineering. 2006. Design Guide [verkkodokumentti]. [Viitattu 4.7.2007]. Saatavissa: <http://www.lenthor.com/pdf/designguide.pdf>.

Lenthor Engineering. 2007. Flex Facts [verkkodokumentti]. [Viitattu 4.7.2007]. Saatavissa: <http://www.lenthor.com/flex-facts/index.htm#2>.

Sivinen, A. 2006. Tuotepäällikkö, KytKentälevy Oy. Helsinki. Puhelinhaastattelu 7.12.2006. Haastattelijana Jyri Mäntysalo. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Stearns, T. 1996. Flexible Printed Circuitry. New York: McGraw-Hill.

Telemeter Electronic. 2002. Flex Circuits [verkkodokumentti]. [Viitattu 8.7.2007]. Saatavissa: http://www.telemeter.de/index.php/shop/content/download/303/2659/file/flex_circuits.pdf

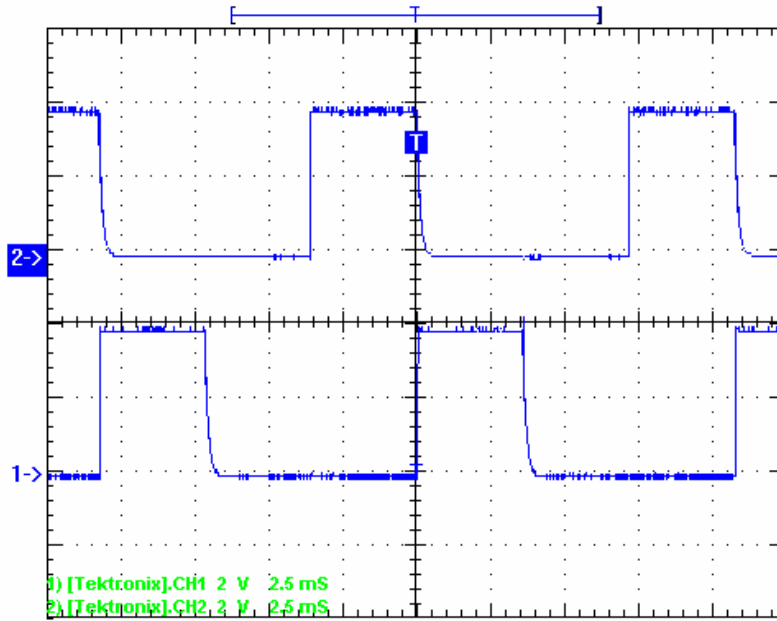
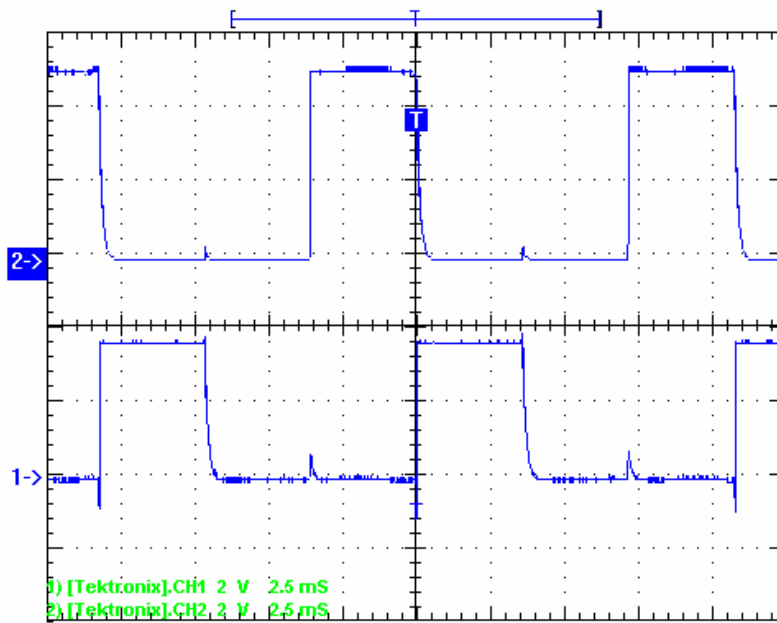
Würth Elektronik. 2006. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.7.2007]. Saatavissa: <http://www.we-online.de>.

LIITTEET

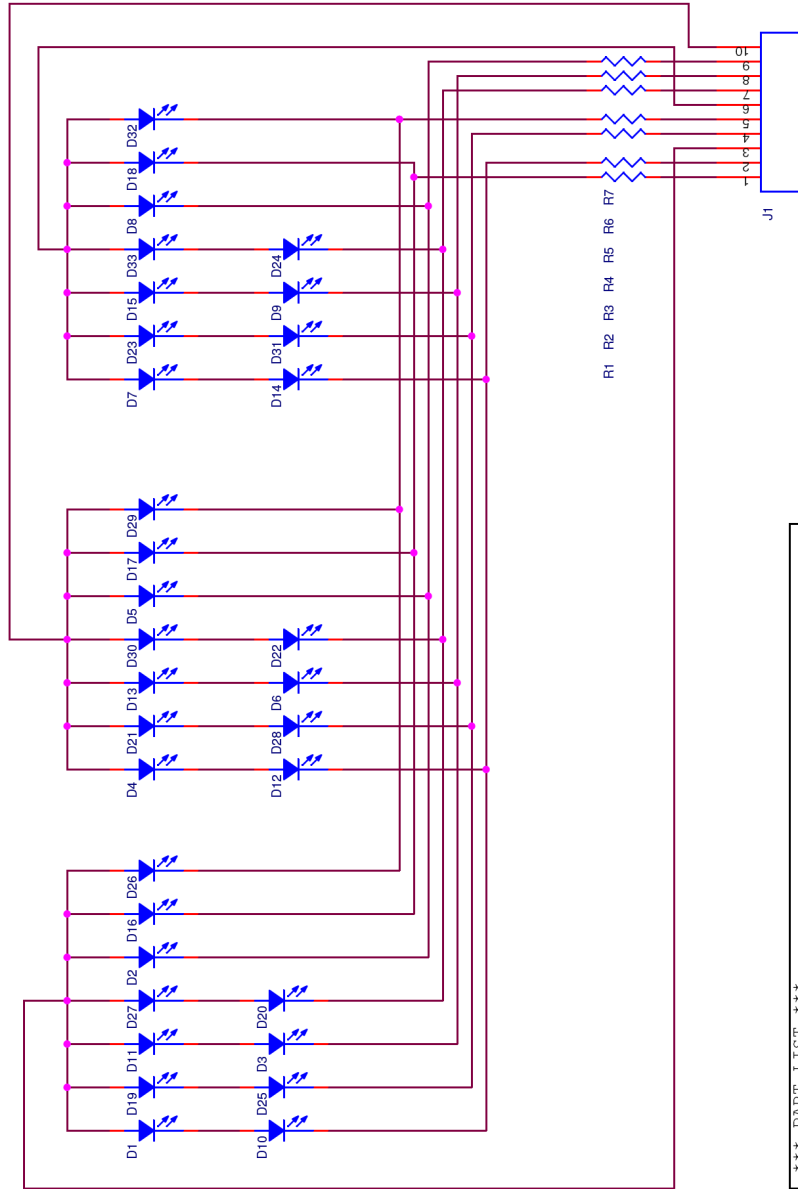
- LIITE 1 HOGA 4.1 – OSKILLOSKOOPPIMITTAUKSET
- LIITE 2 HOGA 5.0 FLEX – KYTKENTÄKAAVIO
- LIITE 3 HOGA 5.0 RIGID – KYTKENTÄKAAVIO
- LIITE 4 HOGA 5.0 FLEX – LAYOUT
- LIITE 5 HOGA 5.0 RIGID – LAYOUT (PANEELI)
- LIITE 6 HOGA 5.0 FLEX – KESKIPISTELISTA
- LIITE 7 HOGA 5.0 FLEX – TILAUSMÄÄRITTELY

HOGA 4.1 – OSKILLOSKOOPPIMITTAUKSET

NÄYTTÖJÄRJESTYS: –DISP3–DISP2–DISP1–

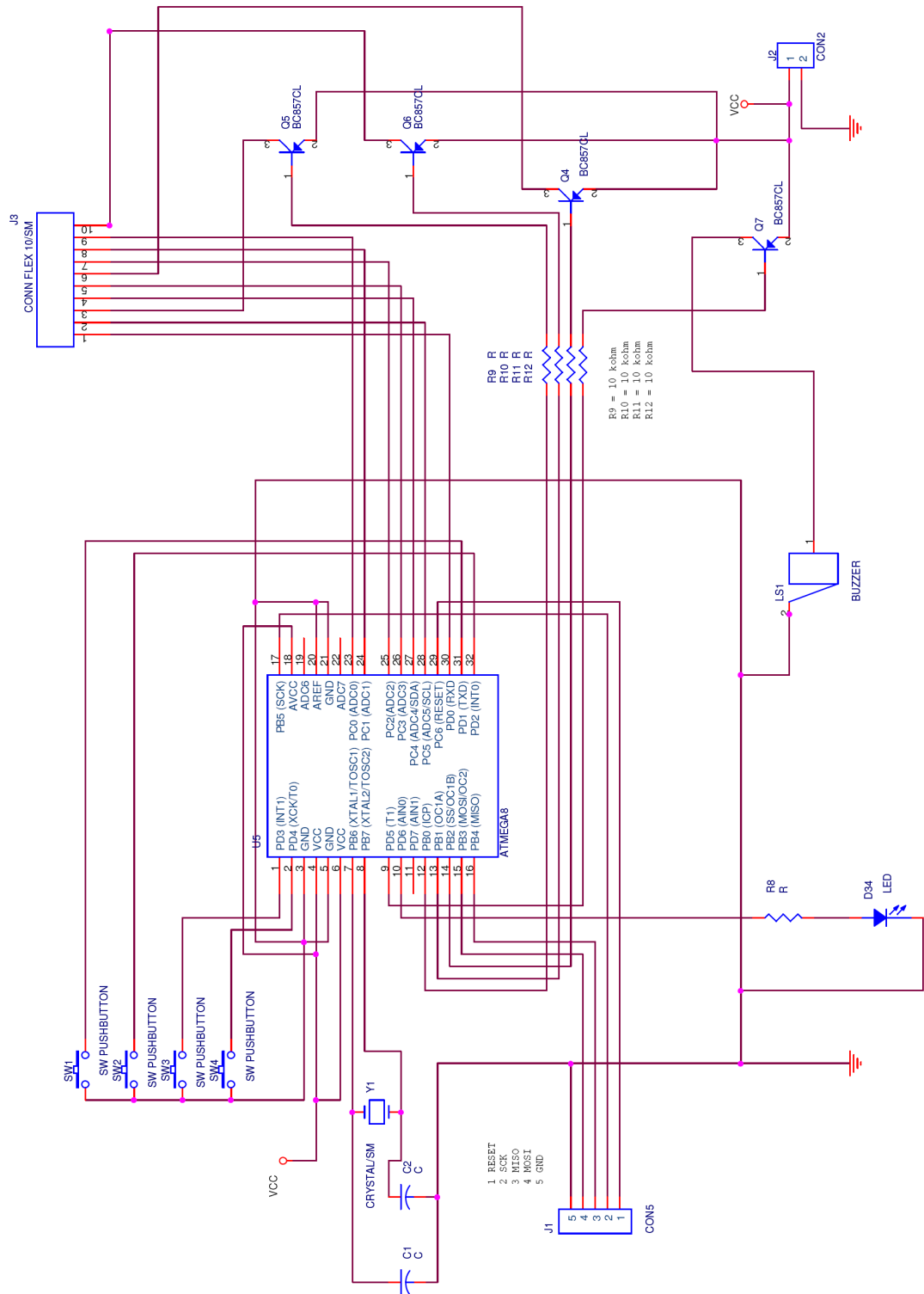
TILANNE 1: 1: DISP1, näytetään: "0"
2: DISP2, näytetään: "0"TILANNE 2: 1: DISP1, näytetään: "8"
2: DISP2, näytetään: "1"

HOGA 5.0 FLEX – KYTKENTÄKAAVIO

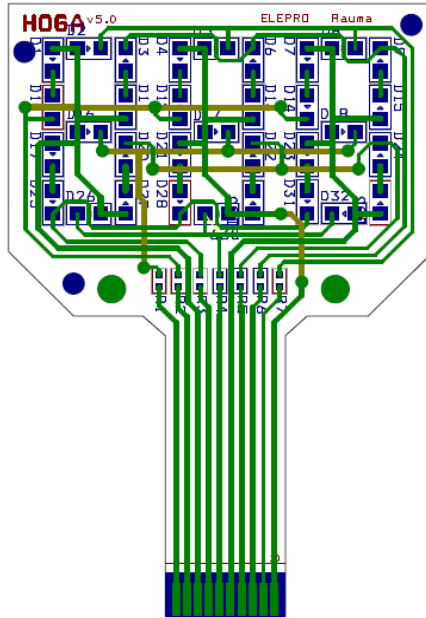


*** PART LIST ***
 J1 = Contacts for top-contact ZIF-connector (1 mm pitch)
 D1 - D33 = Green LED, 2.1 V, 20 mA, 0805 (1318243)
 R1, R4, R7 = 180 Ohm, 0402 (9232672)
 R2, R3, R5, R6 = 82 Ohm, 0402 (9232630)

HOGA 5.0 RIGID – KYTKENTÄKAAVIO

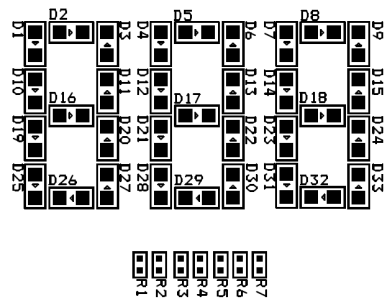


HOGA 5.0 FLEX – LAYOUT

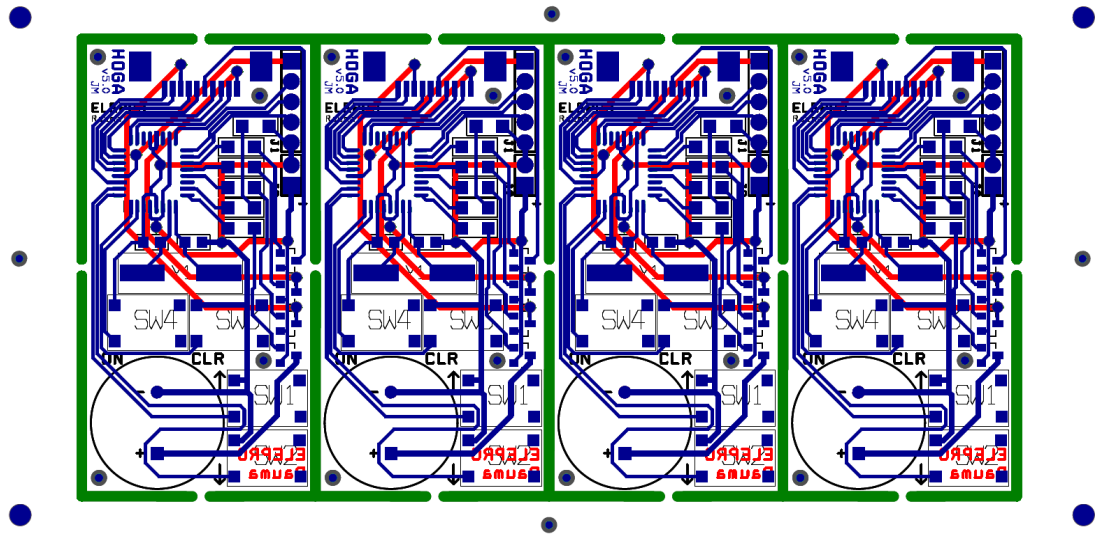


DRILL CHART				
SYM	DIAM	TOL	QTY	NOTE
x	0.500 mm		12	
+	2.032 mm		2	
TOTAL			14	

SMD-KOKOONPANO



HOGA 5.0 RIGID – LAYOUT (PANEELI)



HOGA 5.0 FLEX – KESKIPISTELISTA

INSERTION LIST REPORT

C:\HOGA\HOGA_V_5-20\HOGA_V_5-20.MAX

Mon Jul 09 23:11:57 2007

Author: J. Mäntysalo

REF DES	VALUE	FOOTPRINT	X - COORD	Y- COORD	ROTA- TION	BOARD- SIDE
D1	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	20,05	67,76	270	TOP
D2	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	23,38	68,83	0	TOP
D3	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	26,75	67,77	90	TOP
D4	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	31,74	67,76	270	TOP
D5	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	35,07	68,83	0	TOP
D6	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	38,44	67,77	90	TOP
D7	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	43,43	67,76	270	TOP
D8	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	46,76	68,83	0	TOP
D9	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	50,13	67,77	90	TOP
D10	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	20,05	63,37	270	TOP
D11	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	26,75	63,37	90	TOP
D12	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	31,74	63,37	270	TOP
D13	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	38,44	63,37	90	TOP
D14	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	43,43	63,37	270	TOP
D15	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	50,13	63,37	90	TOP
D16	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	23,38	61,10	0	TOP
D17	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	35,11	61,10	0	TOP
D18	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	46,76	61,10	0	TOP
D19	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	20,05	58,97	270	TOP
D20	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	26,75	58,98	90	TOP
D21	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	31,74	58,97	270	TOP
D22	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	38,40	58,97	90	TOP
D23	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	43,43	58,97	270	TOP
D24	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	50,13	58,97	90	TOP
D25	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	20,05	54,54	270	TOP
D26	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	23,38	53,48	180	TOP
D27	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	26,75	54,54	90	TOP
D28	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	31,74	54,54	270	TOP
D29	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	35,11	53,48	180	TOP
D30	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	38,44	54,54	90	TOP
D31	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	43,43	54,57	270	TOP
D32	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	46,75	53,51	180	TOP
D33	2.1 V, 20 mA; ...	D_0805	50,13	54,54	90	TOP
FID1	round, 1 mm	FIDUROUND	53,00	71,00	0	TOP
FID2	round, 1 mm	FIDUROUND	22,00	47,00	0	TOP
FID3	round, 1 mm	FIDUROUND	17,50	68,50	0	TOP
HOLE1		MTHOLE_REV2	25,50	46,50	0	TOP
HOLE2		MTHOLE_REV2	46,00	46,50	0	TOP

J1	ZIF, 10 top cont.	CONNFLEX10_3	31,40	16,70	0	TOP
R1	180 Ohm, 0402	SM/R_0402	29,80	47,27	270	TOP
R2	82 Ohm, 0402	SM/R_0402	31,60	47,27	270	TOP
R3	82 Ohm, 0402	SM/R_0402	33,60	47,27	270	TOP
R4	180 Ohm, 0402	SM/R_0402	35,40	47,27	270	TOP
R5	82 Ohm, 0402	SM/R_0402	37,30	47,27	270	TOP
R6	82 Ohm, 0402	SM/R_0402	39,10	47,27	270	TOP
R7	180 Ohm, 0402	SM/R_0402	40,90	47,27	270	TOP

HOGA 5.0 FLEX – TILAUSMÄÄRITTELY

PANELOINTI

- 4 piirilevyä yhteen paneeliin
- Joka toinen piirilevy voidaan kääntää 180°
- Paneelin reunoihin voisi jättää kuparoinnit vahvikkeiksi

RAKENNE

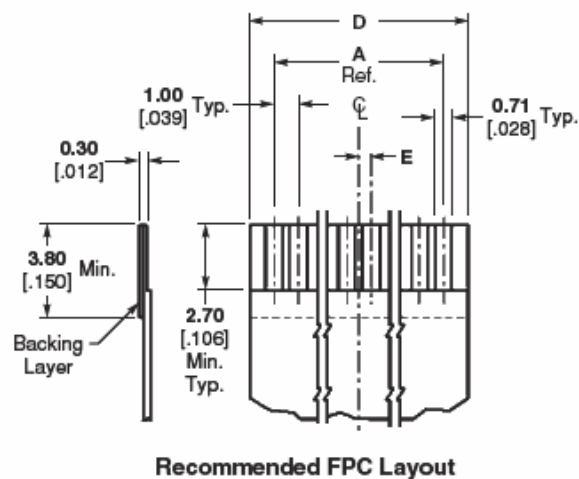
- 2-kerroksinen

Coverlayer 25um
Adhesive 25um
Basematerial PI 50um 2 x Cu 35um
Adhesive 25um
Coverlayer 25um

Kuva 1. Piirilevyn rakenne.

LIITINOSA (1.0mm ZIF, top contact)

- Kokonaisvahvuus: 0,3mm
- Kokonaisleveys (D): 11mm
- Pintakerroksen avausalue määriteltä SMTOP:iin
- Jäykiste: FR4, kiinnitys teipillä, vietään pintakerroksen alle, ks. kuva (so-piva kohta merkattu SSTOP:iin)



Kuva 2. Liitinosan mitat.