

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Elektroniikan koulutusohjelma

Tuomo Tingander

Painettava elektroniikka tuotantotekniikkana

Insinööritö 3.5.2010

Ohjaaja: Teknologiapäällikkö Jarmo
Tuppurainen

Ohjaava opettaja: Yliopettaja Kari Salmi

Tekijä	Tuomo Tingander
Otsikko	Painettava elektroniikka tuotantotekniikkana
Sivumäärä	42 sivua
Koulutusohjelma	elektroniikan koulutusohjelma
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja	Teknologiapäällikkö Jarmo Tuppurainen
Ohjaava opettaja	Yliopettaja Kari Salmi
<p>Insinööri­työn tavoitteena oli selvittää painettavan elektroniikan tekniikoiden toiminta sekä erinäisten musteiden ja substraattien toiminnallisuuksia ja ominaisuuksia. Työ jaettiin kahteen pääosaan: tekniikkaan ja materiaaleihin. Tekniikat osiossa työssä selvitettiin painotekniikoiden eroavaisuuksia ja niiden sopivuuksia erilaisiin tuotantotarpeisiin niiden tuottavuuden ja erottelukyvyn mukaan.</p> <p>Materiaalit osiossa selvitettiin musteiden ja substraattien ominaisuuksia sekä koostumuksia. Musteiden osalta selvitettiin kerrospaksuuksien vaikutusta johtavien musteiden ominaisuuksiin sekä osoitettiin miten johtavuus syntyy painomusteessa.</p> <p>Substraattien osalta esiteltiin yleisemmin käytettävät materiaali PET, PEN, PI ja paperi, sekä selvitettiin näiden yleisimmät ominaisuudet, sekä tutustuttiin johtavien polymeerien toimintaan. Työssä esiteltiin myös painettavan elektroniikan liittämismahdollisuuksia perinteiseen elektroniikkaan.</p>	
Hakusanat	muste, substraatti, johtava polymeeri, painettu elektroniikka, komponentti liitos, painotekniikka, pinnoitus

Author Title	Tuomo Tingander Printed electronics as a manufacturing technique
Number of Pages	42
Date	3 May 2010
Degree Programme	Degree programme in Electronics
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Jarmo Tuppurainen, Technology Manager Kari Salmi, Principal Lecturer
<p>The aim of this thesis was to explore the techniques used in printed electronics as well the functionalities and attributes of certain inks and substrates. The thesis is divided in two major parts: techniques and materials. The techniques section describes the differences between printing techniques and the suitability of the techniques for different manufacturing processes depending on their productivity and resolution power.</p> <p>In the materials section the attributes and consistencies of inks and substrates are depicted. The ink section describes how the impression quality affects to conductive ink's features and shows how conductivity is generated in printing ink.</p> <p>The most commonly used substrates, PET, PEN, Pi and paper, and their characteristic are introduced in the materials section. The materials section also presents the functionality of conductive polymers. This thesis also discusses the possibility of connecting printed electronics and traditional electronics.</p>	
Keywords	ink, substrate, conductive polymer, printed electronics, component bond, print technique, coating

Sisällys

1 Johdanto	5
2 Painettu elektroniikka.....	6
3 Painomenetelmät	8
3.1 Massatuotanto	9
3.1.1 Syväpaino	9
3.1.2 Offset.....	10
3.1.3 Fleksopaino	12
3.2 Tutkimus ja kehitys	13
3.2.1 Mustesuihkutekniikka	13
3.2.2 Seripaino	15
3.2.3 Tampopaino.....	16
4 Erilaiset piirit.....	18
4.1 Passiiviset piirit	18
4.2 Aktiiviset piirit	19
4.2.1 Kerrosrakenne	20
4.2.2 Planaarinen rakenne	20
5 Materiaalit	20
5.1 Painomusteet	21
5.1.1 Johtavat musteet.....	21
5.1.2 Vastusmusteet	25
5.1.3 Eristävät musteet	25
5.1.4 Puolijohdemusteet	27
5.2 Johtavat polymeerit	28
5.2.1 PEDOT:PSS	29
5.2.2 PANI	29
5.3 Erilaiset mustevaatimukset.....	30
5.4 Substraatit.....	30
5.4.1 PET.....	33
5.4.2 PEN	33
5.4.3 PI	34
5.4.4 Paperi	34
5.5 Pinnoitteet	35
6 Komponenttien liittäminen.....	35
6.1 Johtavat liimat	35
6.2 Juotospastat	36
6.3 Press-fit	36
7 Kontaktien luonti.....	37
8 Yhteenvedo ja jatkokehitysmahdollisuudet	37
Lähteet.....	39

1 Johdanto

Elektroniikka-alalla, kuten muillakin teollisuuden aloilla Euroopassa, on herätty todellisuuteen niin sanotusta Kiina-ilmiöstä ja sen mahdollisesta torjumisesta. Nykypäivänä suurin osa perinteisen elektroniikan komponenteista ja tuotteista valmistetaan halpamaissa, joten tältä osalta eurooppalaisten on myönnettävä erävoitto Kiina-ilmiölle. Halvan ja luotettavan elektroniikan tuottamista Euroopassa onkin pidetty lähes mahdottomana.

Ratkaisuksi onkin muodostunut hyvin perinteinen keino: elektroniikan painaminen perinteisen paperipainotekniikan tavoin. Eurooppalaiset ovat olleet edelläkävijöitä erilaisissa painotekniikoissa jo vuosikymmeniä, joten osaaminen tällä alalla on taattua. Painotekniikat mahdollistavat joustavien materiaalien käytön ja täten täysin uudenlaisten tuotteiden innovoinnin ja valmistamisen sekä niiden sulauttamisen osaksi suurempaa kokonaisuutta.

Joustavuus ja sulauttaminen mahdollistavat osien määrän vähenemisen, kestävyyskasvun sekä laitekoteloinnin tarpeettomuuden. Tämä avaa ovia uudelle suunnittelulle ja muotoilulle, jossa materiaaliset ominaisuudet eivät ole enää esteenä. Tällöin pystytään luomaan säästöjä materiaalikustannuksiin koteloinnin ja muotoilun osalta.

Voidaankin sanoa, että perinteinen elektroniikka on murroksessa. Murros on tapahtunut niin materiaalisella tasolla kuin valmistustekniikassa. Painotekniikat mahdollistavat elektroniikan valmistamisen todella suurella volyymilla verrattuna perinteiseen elektroniikkatuotantoon.

Esimerkkinä voidaankin pitää itävaltalaisista puolijohteita valmistavaa Nanoident Technologies -yhtiötä, joka arvioi Tietokone-lehden artikkelissa seuraavasti: ”Yhtiö selittää, että perinteisellä puolijohdevalmistuksella tällainen tuotantomäärä vaatisi noin miljardin euron arvoisen tehtaan ja noin 5000 työntekijää. Tulostustekniikalla tähän

samaan tuotantomäärään päästään vain noin 7 miljoonalla eurolla ja vain noin 50 henkilön työvoimalla.” (18.)

Mihin sitten ollaan menossa? Tämän hetken tekniikoilla voimme valmistaa erilaisia antureita, antennoja, RFID-piirejä, orgaanisia diodeja ja aurinkokennoja.

Lähitulevaisuudessa voidaan valmistaa taiteltavaa origami-elektroniikkaa sekä täysin itsenäisiä järjestelmiä, jotka sisältävät virtalähteen, näytön, logiikan ja toimilaitteet.

(19.)

Tämä opinnäytetyö on selvitystyö painettavassa elektroniikassa käytettävistä tekniikoista ja materiaaleista. Työ esittelee yleisimmät painotekniikat ja tutustuttaa lukijan painettavassa elektroniikassa käytettäviin materiaaleihin. Työ pyrkii vastaamaan kysymyksiin, mitä on painettu elektroniikka ja miten painettua elektroniikkaa valmistetaan.

Selvitystyö tehtiin Metropolia-Ammattikorkeakoulun omistamalle Electria-yksikölle. Electria on elektroniikan tutkimiseen ja valmistamiseen ja näihin liittyvään koulutukseen erikoistunut yksikkö, jonka pyrkimyksenä on laajentaa osaamista myös painetun tekniikan alalle.

Työ on jaettu kahteen eri osa-alueeseen. Ensimmäinen osa-alue käsittelee painettavaa elektroniikkaa käsitteenä, esitellen erilaisia painotekniikoita ja niiden toimintaa. Tällä pyritään perehdyttämään lukijaa peruspainotekniikoiden tuntemukseen ja luomaan käsityksen kustakin painotekniikasta. Toisessa osa-alueessa pääpainona on materiaaliselvitys. Selvitysosuus sisältää musteiden, substraattien ja pinnoitteiden ominaisuuksia, sekä toiminnallisuutta.

2 Painettu elektroniikka

Painetulla elektroniikalla tarkoitetaan menetelmiä, joilla tuotetaan tulostuksen omaisesti elektronisesti toimivia laitteita.

Käytettävät painotekniikat eivät eroa nykyisistä painoteknisistä menetelmistä. Painopohjana voidaan käyttää niin paperia kuin muitakin materiaaleja kuten muovia, keramiikkaa tai piitä, joiden pintaominaisuudet ja olosuhdekestävyydet ovat huomattavasti paperia paremmat.

Uudet joustavat materiaalit, kuten paperit ja muovit, mahdollistavat elektroniikan sulauttamisen osaksi yhä useampaa tuotetta. Kun painettu elektroniikka valetaan muoviin tuotteen osaksi, saadaan yhdellä prosessilla valmistettua sekä optiset komponentit että mekaniikka, tällöin elektroniikasta tulee hyvin sovellusläheinen. (19.) Erilaiset painotekniikat mahdollistavat uudenlaisten kerrosrakenteiden valmistamisen, sillä materiaalia, kerrosten lukumäärää ja paksuutta voidaan vaihdella paikallisesti.

Painettu elektroniikka mahdollistaa uusien sovelluksien lisäksi tuotantomateriaalien käytön ja kuljetusten vähentämisen, mikä taas mahdollistaa elektroniikan valmistamisen edullisesti ja ympäristöä säästäen.

Esimerkiksi lcd-näyttöteollisuus on pyrkinyt tavoitteeseen laskea valmistuskustannuksia noin 20-25 % jokaista näyttökoon kaksinkertaistumista vastaan. Onkin odotettavissa, että vuonna 2011 näyttöpaneelin valmistuskustannus on yhden dollarin luokkaa jokaista näytön tuumaa kohden. (1, s.294.)

Valmistuskustannusten alentuminen mahdollistaa myös RFID-tekniikan hyödyntämisen laajemmalla tuotealalla. Nykyisin piipohjaisia RFID-tunnisteita käytetään eläintunnisteissa ja kulunvalvonnassa. Tekniikan laajenemista päivittäishyödykkeisiin onkin estänyt sen hinta, noin 0,2 dollaria tunnisteelta. Painotekniikalla toteutettu RFID-tunniste voidaan painaa suoraan tuotteen pakkaus materiaaliin, ja näin ollen yhden tunnisteiden kustannukset saadaan 0,01dollarin tasolle. (1, s.294.)

Pääpiirteisenä tavoitteena onkin tuottaa tavanomaista elektroniikkaa vastaavat tuotteet halvemmalla, nopeammin ja yksinkertaisemmilla tuotantotavoilla sekä mahdollistaa

tuotanto normaaleissa tiloissa, ilman korkeita puhtausvaatimuksia. (2, s. 162.)

Perinteisen elektroniikan ja painetun elektroniikan eroavuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Perinteisen- ja painetuntuotannon eroavuudet(20)

	Perinteinen elektroniikka	Painettava elektroniikka
Suorituskyky	Hyvä suorituskyky	Alhainen suorituskyky
Koko / Viivanleveys	Pieni	Suuri
Hinta / kappale	Korkea	Matala
Investointi kustannukset	Suuri	Matala
Valmistus aika	Pitkä	Lyhyt
Olemus	Jäykkä	Joustava

3 Painomenetelmät

Painettu elektroniikka tuotetaan perinteistä paperipainoa vastaavalla tavalla, jossa mustekerrokset on painettu toistensa päälle tuottaen halutun värisävyn tai kuvion, kun taas elektroninen ohutkalvo valmistetaan painamalla toiminnallisia kerroksia toistensa päälle. Huomioitavaa on kuitenkin elektroniikan vaatima korkea painoresoluutio, sillä perinteisessä painotuotannossa mittarina on ihmisen silmän erottelukyky.

Taulukko 2. Painotekniikoiden ominaisuuksia (1, s.297)

Painomenetelmä	Kerrospaksuus (μm)	Erottelukyky (μm)	Viskositeetti (mPas)	Tuottavuus (m^2/s)	Käyttökohde
Fleksopaino	0,8 – 2,5	80	50 - 500	10	Massa
Syväpaino	0,8 - 8	75	50 – 200	60	Massa
Offset	0,5 – 1,5	10 - 50	4000 - 100000	5 - 30	Massa
Mustesuihku	< 0,5	20 - 50	1 – 30	0,01 – 0,5	t&k
Seripaino	30 - 100	20 - 100	500 – 5000	2 – 3	t&k
Tampopaino	1 - 2	20	> 50	0,1	t&k

Käytettävät painomenetelmät voidaan jakaa kahteen eri ryhmään.

Massatuotantomenetelmiksi voidaan kutsua offset-, flekso- ja syväpainotekniikoita, joiden tuottavuus on suuri. Vastakohtaisesti mustesuihku, tampo- ja seripainotyyppejä menetelmiä voidaan kutsua tutkimus- ja kehitysmenetelmiksi, kuten taulukossa 1 on esitetty.

3.1 Massatuotanto

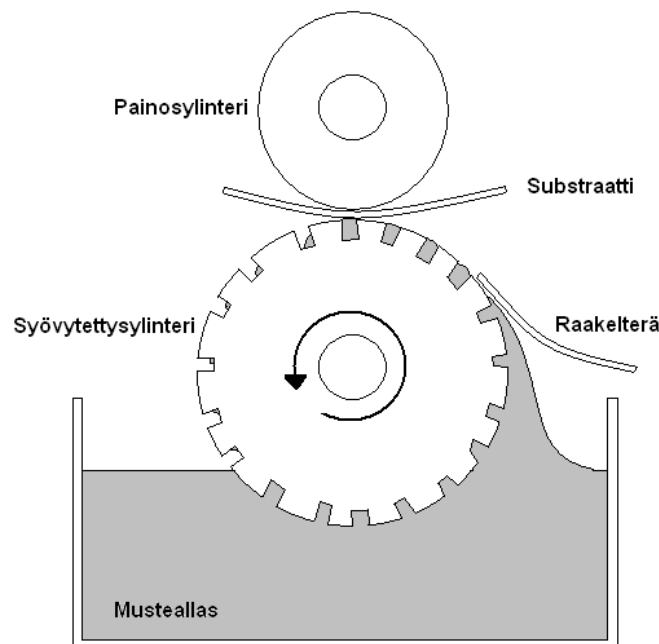
Eri lähteissä puhutaan jopa $160 \text{ m}^2/\text{s}$ tuottavuudesta. Suuren tuotantokapasiteettinsa johdosta nämä menetelmät sopivat hyvin tehdasmaisiin valmistuslaitoksiin, joissa pyritään laskemaan tuotantokustannukset minimiin.

3.1.1 Syväpaino

Syväpaino voidaan lukea mukaan massatuotantomenetelmiin, sillä sen tuottavuus on $60 \text{ m}^2/\text{s}$.

Syväpainomenetelmässä painava pinta on ei-painavaa alempana. Painoaihe aikaansaadaan kuparipintaisella sylinterillä joko kaivertamalla tai syövyttämällä. Painovaiheessa painopinta kastellaan juoksevalla musteella ja ylimääräinen muste pyyhkitään pois metallisella raakeliterällä. Muste jää vain painopinnansyvennyksiin ja siirtyy painokontaktin aikana painettavalle pinnalle. (1, s.300; 7 ; 29, s.23.) Tapahtuma on esitetty kuvassa 1.

Syväpainoa voidaan tehdä myös käyttäen offset-menetelmää. Menetelmässä syövytetyn sylinterin ja painosylinterin välille asennetaan kuminen tela. Tällöin muste painetaan ensin kumitelalle ja painosylinterin painaessa painopinnan kumitelaa vasten painopinnalle. (1, s.300; 7; 29, s.23.)



Kuva 1. Syväpainon periaate

3.1.2 Offset

Offset on laajalti käytetty painomenetelmä, jonka tuottavuus voi kohota jopa $30 \text{ m}^2/\text{s}$, riippuen käytetystä konetyypistä. Konetyyppejä ovat arkkioffset ja rotaatio-offset. Arkkityyppiset koneet painavat tuotteen arkeille ja rotaatiossa käytettävä painoalusta on rullana. Rotaatiossa käytetään kahta eri kuivatustekniikkaa: painomusteen kuivatuksella varustetut heatset-offsetkoneet ja ilman kuivainta olevat coldset-offsetkoneet. Joissain rotaatiossa saatetaan hyödyntää kumpaakin tekniikkaa. (1, s.299; 7; 29, s.26.)

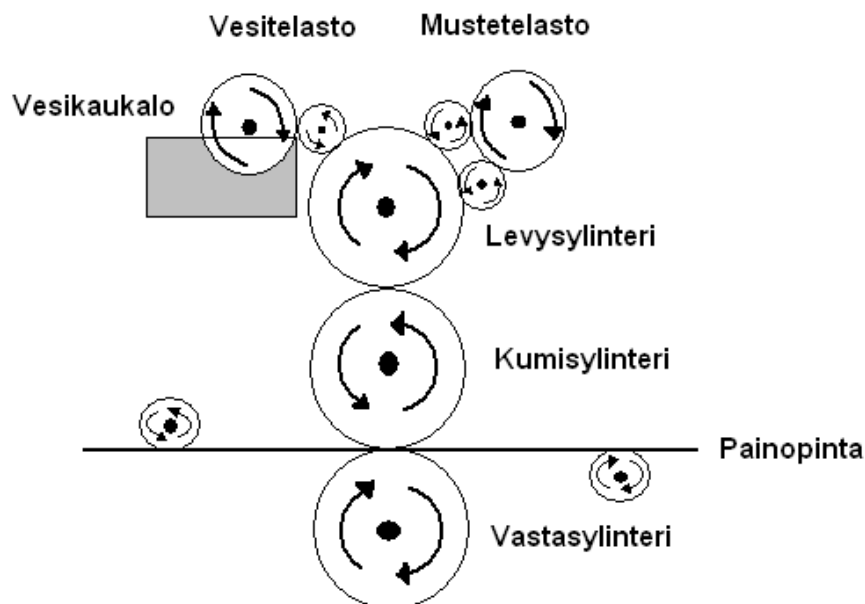
Offsetprosessissa kastellaan painolevy ensin kostutusvedellä, joka leviää levyn ei-painavalle pinnalle, jonka pintaenergia on veden (H_2O) pintajännitystä korkeampi. Tämän jälkeen levyille levitetään öljypohjainen painomuste, joka tarttuu ainoastaan painaville pinnoille. Tämän jälkeen painoväri siirtyy levyltä kumipinnalle ja siitä painettavalle pinnalle. Molempien pintaenergia on korkeampi kuin painomusteen pintajännitys. (1, s.299; 7; 29, s.26.)

Painolevyn painavan pinnan sanotaan olevan oleaofiilinen eli öljyhakuiseksi ja samalla hydrofodinen eli vettä hylkivä. Ei-painavaa pintaa kutsutaan hydrofiiliseksi eli vesihakuiseksi. (1, s.299; 29, s.26.)

Eräiden painomateriaalien kuten muovien pintaenergia on liian alhainen musteen leviämiseksi. Tästä johtuen pintaenergiaa on nostettava primerien tai koronkäsittelyn avulla. (1, s.299; 7; 29, s.26.)

Offsetpainoyksikkö koostuu vesi- ja mustelaitteesta sekä levy-, kumi- ja vastasynteristä. Vesilaitte koostuu sekä vesikaukalosta että vesiteloista. Mustelaitte vastaavasti koostuu mustekaukalosta ja musteteloista. Vesitelasto voi olla yhteydessä mustetelastoon, jolloin kostutusvesi emulgoituu painoväriin ennen siirtymistä levyille. (1, s.299; 7; 29, s.26.)

Offsetpainokoneen toiminta on esitetty kuvassa 2.

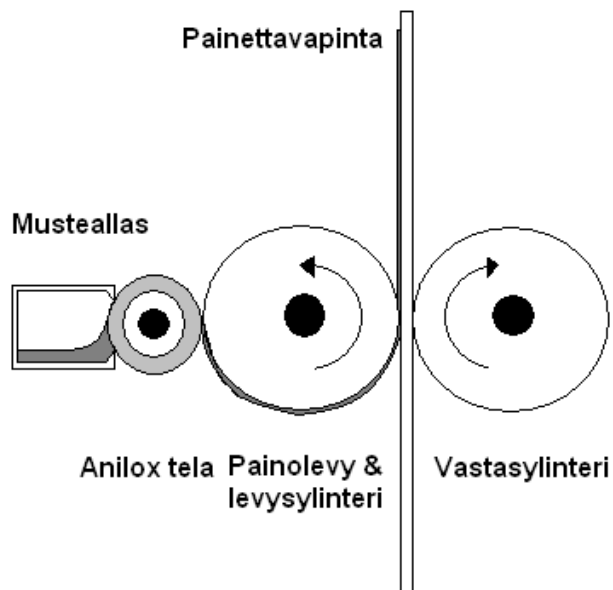


Kuva 2. Offsetpainon periaate

3.1.3 Fleksopaino

Fleksopaino on kohopainomenetelmä, jossa käytetään joustavia painolevyjä tai –laattoja. Se vastaa toimintaperiaatteeltaan kumista leimasinta, jossa joustavan kumipinnan avulla siirretään kuvia halutulle pinnalle. Myös fleksopaino luetaan massatuotantomenetelmäksi sen $10 \text{ m}^2/\text{s}$ tuottavuuden johdosta. (1, s.300; 7; 29, s.25.)

Fleksopainon painoaihe on kohokuviona eli reliefinä joustavasta materiaalista valmistetulla painolevyllä tai laatalle. Juokseva, matalaviskositeettinen painomuste annostellaan painolevylle rasteri- eli anilox-telalla, jonka rasterikuppirakenne muistuttaa syväpainosylinteriä. Muste siirtyy painolevyn koholla oleville pinnoille ja niiltä painonipissä painettavalle pinnalle. (1, s.300; 7; 29, s.25) Toiminta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Fleksopainoperiaate

3.2 Tutkimus ja kehitys

Tutkimus ja kehitys tekniikoilla tarkoitetaan tekniikoita, jotka mahdollistavat yksittäisten tai vähäisten erämäärien valmistuksen. Näin ollen ne soveltuvat hyvin tuoteprototyyppien luontiin sekä materiaalitestaukseen.

3.2.1 Mustesuihkutekniikka

Mustesuihkutekniikka on tällä hetkellä suosituin painetekniikka sen tuotannollisen joustavuuden ja kustannustehokkuuden vuoksi. Tekniikalla voidaan minimoida kalliiden materiaalin tarve tuotettaessa prototyyppinä ja kokeilueriä.

Mustesuihkutekniikka sopii parhaiten juuri tuotannon tutkimus- ja kehityshankkeisiin kuten taulukosta 2. voidaan päätellä, sillä se omaa huonon tuottavuuden verrattaessa muihin tuotantotekniikoihin. Huomioitavaa on mustesuihkutekniikoiden erottelukyky, joka on luokkaa 20-50 μm , osan elektroniikkakomponenttien vaatiessa jopa 10 μm erottelukykä.

Mustesuihkutekniikka perustuu pieniin mustepisaroihin, jotka suunnataan painettavan materiaalin pinnalle elektronisesti ohjattuna. Tässä tekniikassa itse painolaite ei muodosta kontaktia painopinnan kanssa, joten sitä kutsutaan kosketuksettomaksi painomenetelmäksi, sillä pisarat niin sanotusti lennätetään painettavalle pinnalle. (1, s.301; 2, s.320; 26, s.10-13; 29, s.28-30.)

Mustesuihkutulostimet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään niiden musteen annostelutekniikan perusteella: niin sanottuun jatkuvaan ja epäjatkuvaan tekniikkaan (1, s.301; 2, s.320; 26, s.10-13; 29, s.28-30.) Tekniikat ovat kuvattuna kuvassa 4.

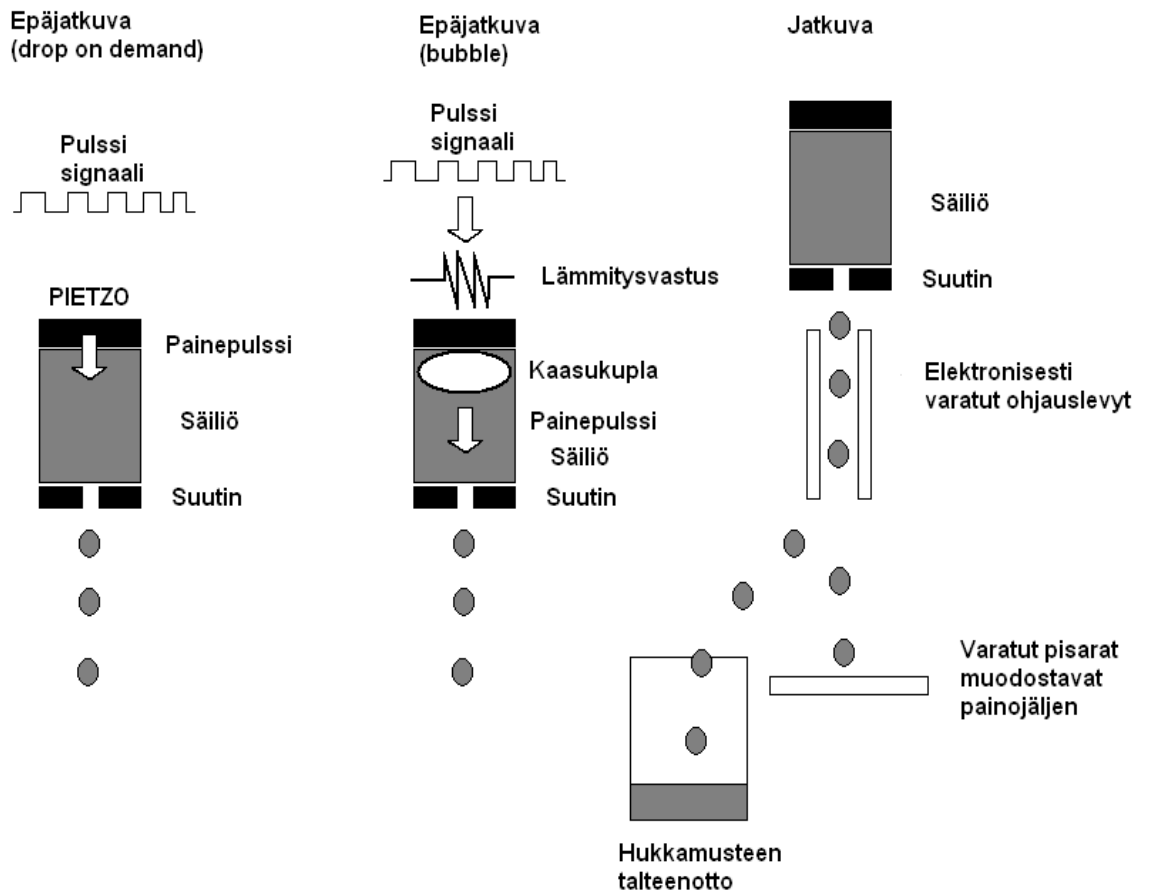
Jatkuva (Continuous) tekniikkaa hyödyttävillä laitteilla muste syötetään paineen avulla suuttimen läpi painopinnalle. Tällöin suuttimesta purkautuva mustesuihku muuttuu pisaroiksi. Pisaroiden koko ja määrä määräytyvät suuttimen koon, nestemäisen musteen viskositeetin ja paineen perusteella. Painomustepisaroita ohjataan niihin syötettävän

varauksen avulla ja niin ikään varattujen levyjen avulla. Ei-painettavan pinnan kohdalla painomustepisarat ohjataan jätevärisäiliöön tai uudelleen kiertoon. (1, s.301; 2, s.320; 26, s.10-13; 29, s.28-30.)

Epäjatkuvassa (Drop-on-Demand) tekniikassa suuttimesta annostellaan mustepisaroita vain tarvittaessa. Tarvittaessa pisara muodostetaan käyttämällä pietzo elektronista kidettä antamalla sille herätejännite pulssin. Pietzo-kiteen värähtely aiheuttaa paineaallon, joka muodostaa pisaran. Paineaallon syntyminen johtuu pietzo-kiteen laajenemisesta ja pienenemisestä signaalin pulssien mukaan. (1, s.301; 2, s.320; 26, s.10-13; 29, s.28-30.)

Epäjatkuvassa tekniikassa käytetään myös niin sanottua kupla (Bubble) -tekniikkaa, jossa paineaalto muodostetaan kuumentamalla mustetta, jolloin muodostuu kaasua. Tämä kaasuun laajeneminen aiheuttaa paineen kasvun, joka vuorostaan muodostaa pisara. Kaasukupla muodostetaan käyttämällä mikrolämmittimiä. (1, s.301; 2, s.320; 26, s.10-13; 29, s.28-30.)

Epäjatkuvalla tekniikalla päästään huomattavasti tasaisempaan painokoostumukseen tuotteen pinnalla sekä parempaan hallittavuuteen verrattuna jatkuvaan tekniikkaan. Tämä johtuu siitä, että epäjatkuva tekniikka mahdollistaa pisaralle lyhyemmän lentomatkan ja yhtäläisemmän koostumuksen, sillä mustepisarat eivät sisällä elektronisesti varattavia hiukkasia kuten magnesiumia. (1, s.301; 2, s.320; 26, s.10-13; 29, s.28-30.)

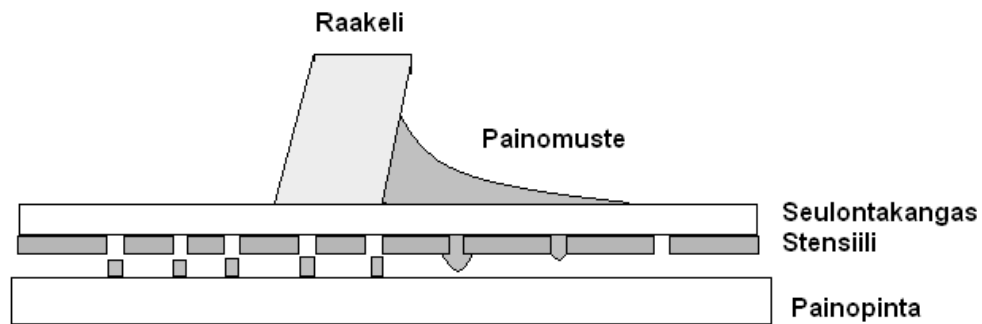


Kuva 4. Mustesuihkutekniikan periaatteet

3.2.2 Seripaino

Seripaino on painotekniikka, joka perustuu läpäisevään seulontakankaaseen, johon on kiinnitetty painoaiheen sisältävä stensiili. Muste levitetään seulontakankaan pinnalle ja siirretään puristamalla seulontakankaan läpi alla olevalle stensiilille. Stensiilin avauksien läpi muste siirtyy halutulle painopinnalle, kuten kuvassa 5 on esitetty.

Seripaino vastaakin perinteisessä elektroniikassa käytettävää pastanpainotekniikkaa. (1, s.298; 28, s.24; 27, s.32.)

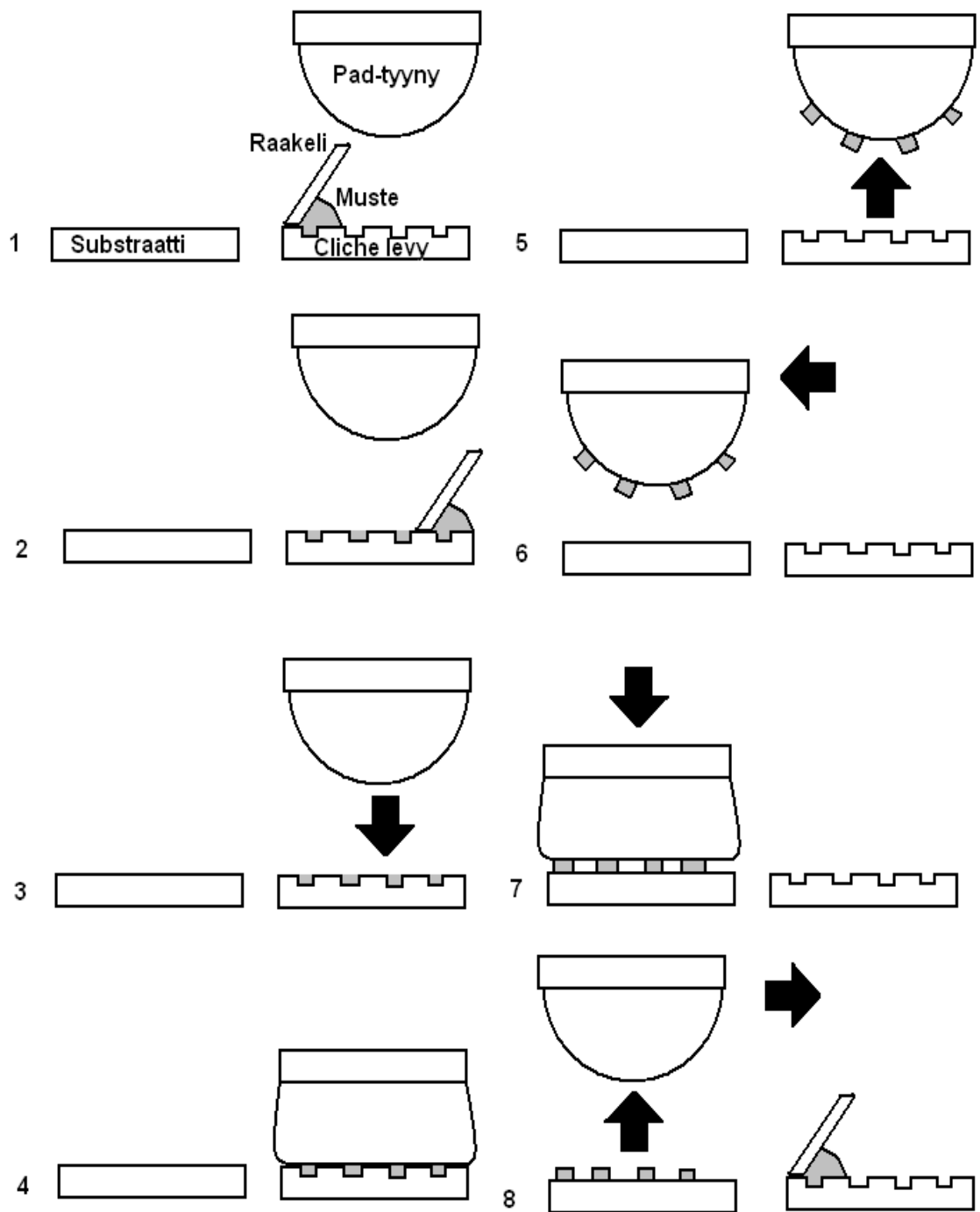


Kuva 5. Seripainon periaate

Tyypillisiä passiivisia seripainolla toteutettuja tuotteita ovat komponenttien vedot ja tulostetut vastukset. Tuotteet on tavallisesti painettu kestämuoviin tai epoksiin käyttäen epäorgaanisia partikkeleita kuten hopeaa (Ag). Valmistuotteina ovat kalvokytkimet ja näppäimistöt.

3.2.3 Tampopaino

Tampopainotekniikkaa liitetään usein osaksi offsetpainoa, sillä muste säilytetään etsatulla pinnalla, joka tuodaan kosketukseen kuljetuspinnan kanssa. Kuljetuspinta puristetaan painopintaa vastaan ja painettava kuva siirtyy substraatille. Tyypillinen tampopainotapahtuma on esitetty kuvasarjassa 6.



Kuva 6. Tampopainon periaate

Ensimmäiseksi cliché-levylle asetetaan tarvittava määrä mustetta ajamalla muste raakelilla levyn yli. Tämän jälkeen joustava pad-tyyny painetaan levyä vasten, jolloin muste tarttuu sen pintaan adheesion voiman avulla ja koheesio pitää aineen halutussa

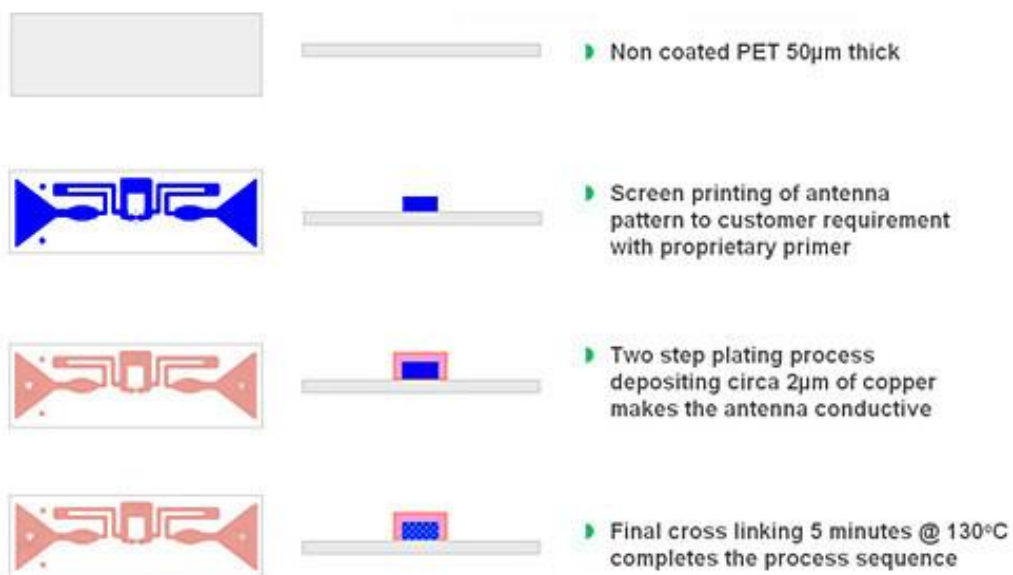
muodossa johtuen sen keskinäisestä vetovoimasta. Adheesio ja koheesio saadaan aikaan musteen sisältämällä haihtuvilla liuottimilla. Haihtumista tapahtuu, kun muste levitetään cliché-levyn pinnalle. Näin ollen sen tartuntakyky paranee musteen viskositeetin kasvaessa, jonka jälkeen musteen siirto padilla on mahdollista. Saman periaatteen mukaan tapahtuu myös musteen siirtyminen padilta substraatille.(2, s. 300; 28, s.27.)

4 Erilaiset piirit

4.1 Passiiviset piirit

Passiivisia piirejä, kuten vastuksia, kondensaattoreita sekä johtimia voidaan tuottaa painamalla erityyppisiä epäorgaanisia musteita haluttuun muotoon. Epäorgaaniset musteet saattavat sisältää kultaa, hopeaa, hiiltä tai kuparia. Näille kaikille mustetyypeille on ominaista niiden sähkönjohtavuus. Täten niitä voidaan kutsua johtaviksi muisteiksi, jotka on esitelty myöhemmin työssä. Alla olevassa kuvassa 7 on kuvattu RFID-antennin valmistus painotuotteena.

Key Process Steps



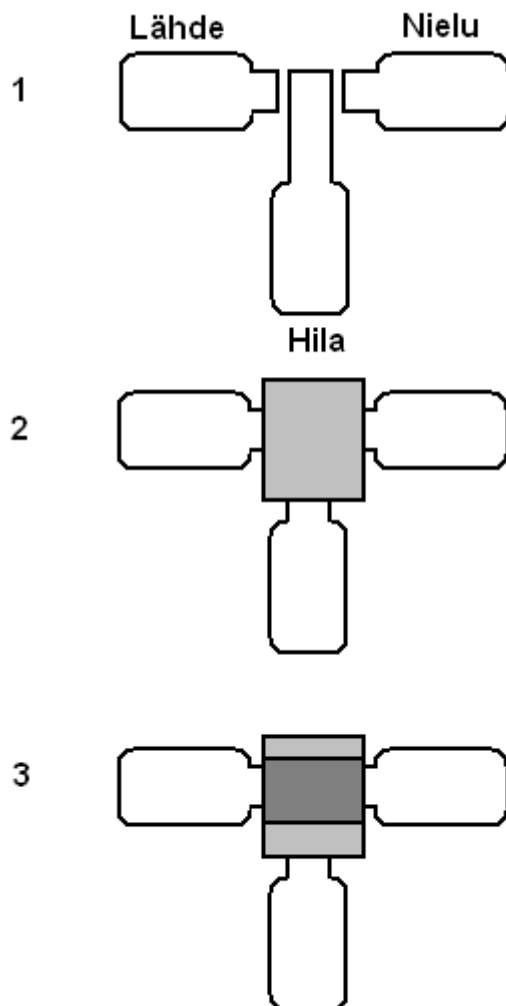
Kuva 7. RFID-antennin valmistus (17)

4.2 Aktiiviset piirit

Aktiivisten piirien tuottamiseen vaaditaan ainakin kolme toiminnallista komponenttia: johdin-, puolijohdin- sekä eristävä komponentti.

Näiden kolmen peruskomponentin kombinaatiolla voidaan toteuttaa erinäisiä ratkaisuja, esimerkiksi johtimia, vastuksia, kondensaattoreita ja kanavatransistoreja (FET).

Komponenteista voidaan luoda toiminnallisia piirejä ja täten toteuttaa kokonaisia elektronisia järjestelmiä. (2, s. 169-172.)



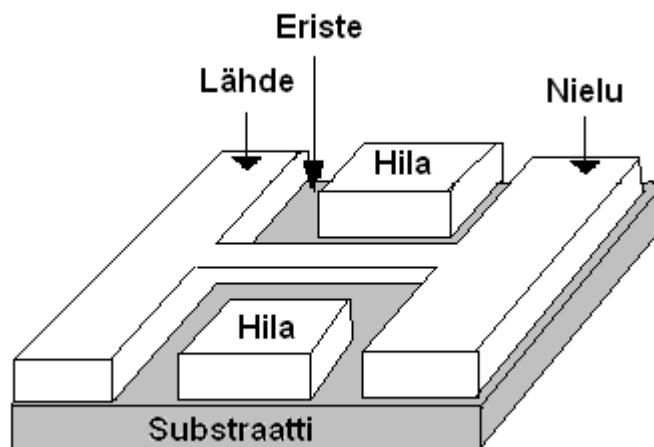
Kuva 8. FET-transistorin valmistus

4.2.1 Kerrosrakenne

Kuvassa 8 on esitetty kanavatransistorin rakenteen valmistus painotekniikalla. Ensiksi johtavalla musteella toteutetaan transistorin jalat, lähde (source), nielu (drain) ja hila (gate). Seuraavaksi dielektrinen muste painetaan piirille eristämään hila. Tämän jälkeen painetaan puolijohtavalla musteelle silta dielektronisen eristeen yli lähteeltä nielulle. (2, s. 170.)

4.2.2 Planaarinen rakenne

Transistoripiirejä voidaan valmistaa myös edellisestä esimerkistä poiketen planaarisesti. Tämä tarkoittaa piirin kerrosten valmistamista vertikaalisen sijasta horisontaalisesti. Planaarinen valmistus mahdollistaa lopputuotteen paksuuden minimoinnin sekä nopeuttaa tuotantoa kokonaistuotteen valmistuessa harvemmillä painokerralla. Planaarisen PNT-transistorin (Planaric Nano Transistor) rakenne on kuvattu kuvassa 9.



Kuva 9. Planaarisesti painettu PNT-transistori (21)

5 Materiaalit

Tässä osiossa esitellään piirien valmistusta sekä perehdytään musteiden, substraattien ja pinnoitteiden ominaisuuksiin.

5.1 Painomusteet

Seuraavissa osiossa perehdytään erilaisten komponenttien materiaalisiin ominaisuuksiin tutkien musteiden ja substraattien olemusta ja niille sopivia käyttökohteita.

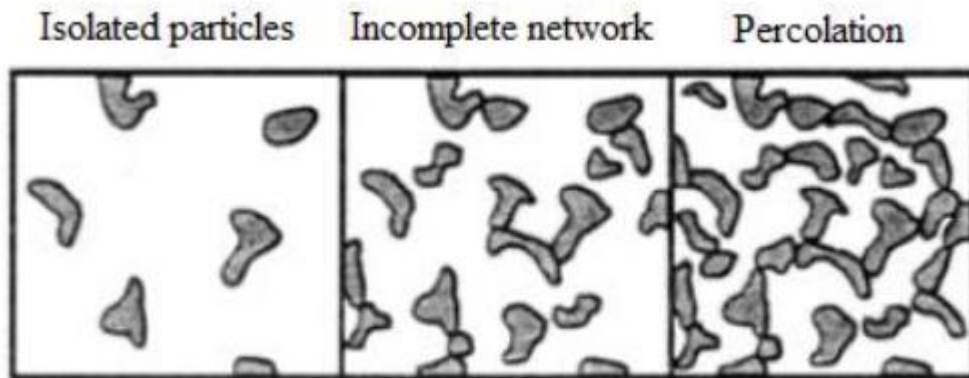
Kuten aktiivisten piirien esittelyssä tuli ilmi, elektroniikkapiirien toteuttaminen vaatii kolmea funktionaalista komponenttia: johteen, puolijohteen ja eristeen.

Sähköä johtavilla musteilla muodostetaan sähköiset kontaktit piirien välille, joten niitä kutsutaan johtaviksi musteiksi. Toisaltaan johtavia musteita, joiden johtavuus on alhainen, voidaan käyttää vastusten valmistamiseen. Eristeillä pyritään estämään varauksen kulkeutuminen ei-toivotuille alueille ja eristämään monikerrosrakenteiden kerrosten väliset johtavuudet.

5.1.1 Johtavat musteet

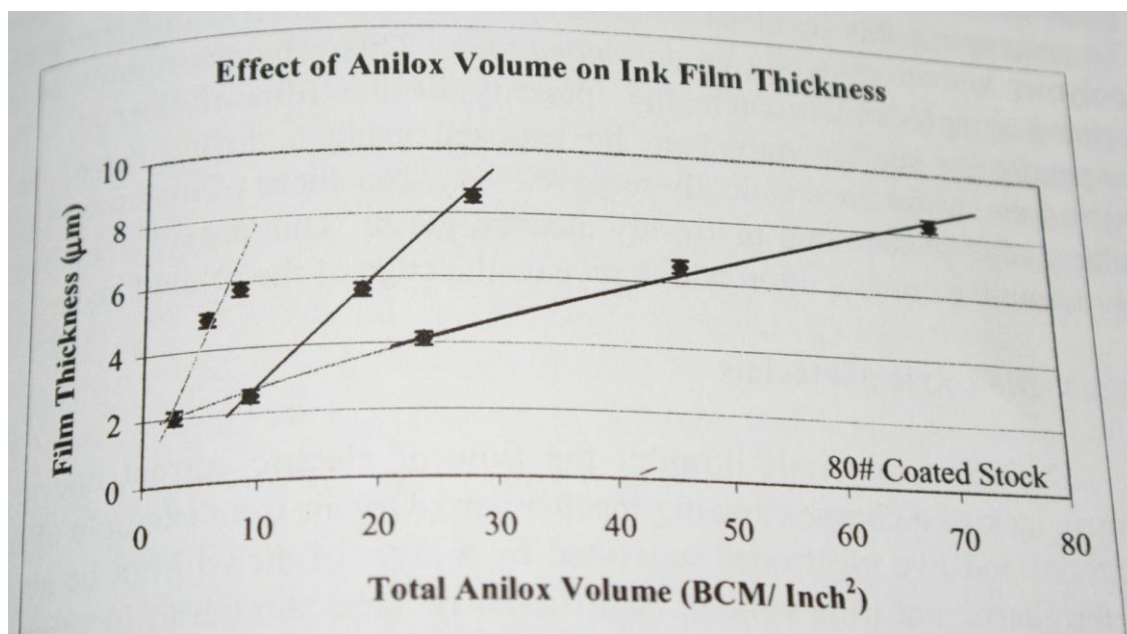
Johtavat musteet mahdollistavat elektronien liikkumisen materiaalissa tämän ollessa jännitteessä. Johtavien musteiden johtavuus perustuu johtavien partikkeleiden luomiin sähköisiin reitteihin väliaineessa.

Komposiittisissa musteissa on välttämätöntä muodostaa partikkelitasoinen johtavuustila, joissa johtavat partikkelit (Au, Ag, Cu ja erilaiset hiiliyhdistelmät) sidotaan toisiinsa käyttäen epäjohtavia väliaineita. Tämä muodostaa pisteen, jossa johtavat partikkeliverkot muodostavat pysyviä reittejä sähköiselle johtavuudelle. Tätä ilmiötä kutsutaan perkolaatiokynnykseksi. Tämän pisteen saavutettua sähköinen johtavuus alkaa kasvaa voimakkaasti muodostaen lopullisesti partikkeliaineen ominaisjohtavuuden tason. (2, s.178.)



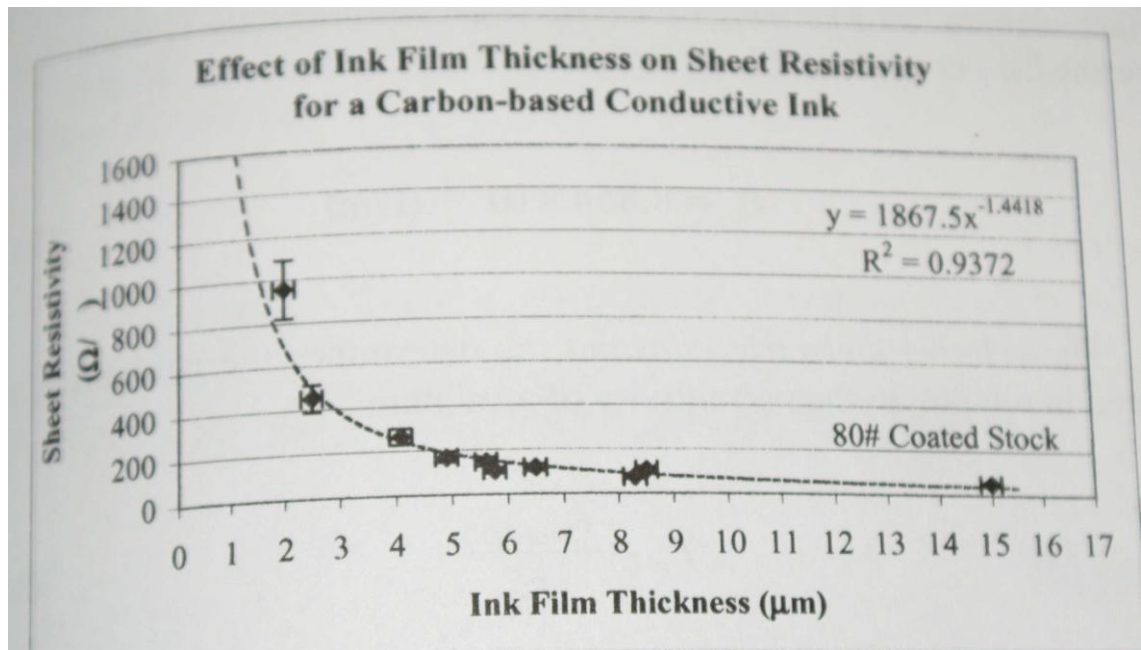
Kuva 10. Perkolaatiokynnyksen muodostuminen (22)

Kuvasarjassa 10 on esitetty menetelmä, jolla voidaan kasvattaa johtavan musteen johtavuutta. Ylimmässä kuvassa on esitetty johtavia partikkeleita epäjohtavassa väliaineessa. Kuten kuvasta voidaan todeta, johtavien partikkeleiden määrä on riittämätön muodostamaan pysyviä johtavuusreittejä. Tämä tarkoittaa sitä, että muste on epäjohtavaa eikä saavuta perkolaatiokynnystä. Musteesta saadaan johtava lisäämällä siihen johtavia partikkeleita. Tämä mahdollistaa yhä useampien johtavuusverkkojen muodostumisen. On kuitenkin huomioitavaa, että johtavien partikkeleiden lisääminen polymeeriseen sidosaineeseen aiheuttaa sidosaineen rakenteen heikkenemisen ja täten musteen käytettävyys rajoittuu. (2, s.178.)



Kuva 11. Kennon tilavuuden vaikutus paksuuteen (2, s.181).

Musteen johtavuutta voidaan myös parantaa kasvattamalla mustekerroksen paksuutta painamalla useampia kerroksia päällekkäin. Kuvissa 11 ja 12 on esitetty teoksessa ”Printed organic and molecular electronics” suoritetuista laboratoriomittauksista käyttäen hyväksi fleksopainotekniikkaa ja hiilipohjaista johtavaa mustetta. Taulukko 11 esittelee kuivan mustekerroksen paksuutta savipinnoitteisella paperilla, vaihdellen anilox-telan kennojen tilavuutta ja painokertojen määrää. Anilox-telan kennojen tilavuudet ovat: 2,8, 8,4 ja 23,6 miljardia neliömikroa tuumalla (BCM/in^2) ja painokerrat vaihtelevat yhdestä kolmeen. Ymmärrettävästi anilox-kennojen tilavuuden kasvattaminen ja painokerroksien lisääminen aiheuttaa kokonaiskerrospaksuuden kasvua. On kuitenkin huomioitavaa, että kolme kerrosta paksuudeltaan $2.8 \text{ BCM}/\text{in}^2$ anilox-telalla tehtyä vastaa kahta kerrosta paksuudeltaan $8.4 \text{ BCM}/\text{in}^2$, kun taas kolme kerrosta paksuudeltaan $8.4 \text{ BCM}/\text{in}^2$ muodostaa suurin piirtein saman paksuuden kuin kolme kerrosta paksuudeltaan $23.6 \text{ BCM}/\text{in}^2$. (2, s.180.)



Kuva 12. Painokerrosten paksuuden vaikutus resistiivisyyteen (2, s.181).

Kuva 12 esittelee painokerrosten paksuuden vaikutusta sen resistiivisyyteen. Taulukosta voidaan todeta, että resistiivisyys pienenee paksuuden kasvaessa. Huomattavaa kuitenkin on, että kerroksen ollessa huomattavan ohut seoksen johtavuus laskee nopeasti.

Musteissa käytettävä partikkeli materiaali vaikuttaa lopullisen painoaihion johtavuuteen. Taulukossa 3 on esitetty hopean, kuparin ja hiilen tyypillisiä neliöresistiivisyyksiä käytettäessä Dupoint-yhtiön musteita.

Taulukko 3. Materiaalien neliöresistiivisyydet (25).

Materiaali	Neliöresistiivisyys (1 mil paksuus)
Hopea	7-20 mΩ/□
Kupari	30-130 mΩ/□
Hiili	20-100 mΩ/□

Johtavien musteiden johtavuus määritellään usein laskemalla neliöresistiivisyys R_s . Neliöresistiivisyys (R_s) voidaankin ratkaista mittaamalla suorakulmaisen painatuksen resistiivisyys (R) ja jakamalla se suorakulmion pituuden ja leveyden jaon tuloksella.

Johtavan suorakulmion pituuden jakaminen sen leveydellä ilmoittaa tasasivuisten neliöiden määrän tasolla, ja täten resistiivisyys voidaan ilmoittaa ohmia neliöllä (Ω/\square). Painetussa elektronikassa johtavuus on määritelty tasolle, jonka paksuus on 1 mil ($24,5\mu\text{m}$) (2, s.180.)

$$R_s = \frac{R}{\left(\frac{L}{W}\right)}$$

R_s = Neliöresistiivisyys

R = painatuksen resistiivisyys

L = painatuksen pituus

W = painatuksen leveys

5.1.2 Vastusmusteet

Vastustavat eli korkeasti resistiiviset musteet valmistetaan hiilestä. Niitä useimmin tarjotaan joko 100Ω , 1000Ω ja $10\,000 \Omega$, jotka voidaan sekoitetaan tarvittavan resistiivisyyden mukaan. Tarkan resistiivisyyden määrittämiseksi käytetäänkin johtavissa musteissa esitettyä neliöresistivisyyden kaavaa. Vastusmusteissa kuten johtavissa musteissakin käytettäviä polymeerejä on useita kuten vinyyli, epoksi ja akryyli. (24, s.37-38.)

5.1.3 Eristävät musteet

Eristemusteilla tarkoitetaan polymeerimusteita, joilla voidaan eristää esimerkiksi vedot toisistaan tai mahdollistamaan erilaiset ylivedot. Toisin sanoen eristeitä käytetään estämään virran kulkua.

Dielektriset materiaalit ovat tärkeimpiä aineita valmistettaessa transistoreita, sillä ne toimivat sähköeristeinä, joiden sisällä sähkökenttä on heikompi kuin tyhjiössä. Kuiva ilma on hyvä esimerkki tällaisesta materiaalista, sillä kytkettäessä kaksi erillistä johdinta 1 cm matkalle toisistaan tarvitaan 47 kV sähkökenttä muodostamaan valokaari

johdinten välille. Tätä kutsutaan materiaalin läpilyöntikestävyudeksi. (2, s.182-184; 28, s.35.)

Materiaalin dielektrisyysvakio eli suhteellinen permittiivisyys ϵ ilmoittaa, kuinka moninkertaiseksi kondensaattorin kapasitanssi kasvaa ilmaeristeiseen kondensaattoriin verrattuna, jos sen levyjen väli täytetään kyseisellä aineella. Tyhjiön permittiivisyys ϵ_0 on $8,85419 \cdot 10^{-12}$ (F/m), joten materiaalin suhteellinen permittiivisyys saadaan kaavasta

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{\text{materiaali}}}{\epsilon_0},$$

jossa $\epsilon_{\text{materiaali}}$ on materiaalin permittiivisyys. (2, s.182-184; 28, s.35.)

Taulukossa 4 on esitetty joidenkin eristeiden ominaisuuksia. Eristeitä käytetäänkin eritoten valmistettaessa kondensaattoreita, ja on huomattavaa, miten eristemateriaalin suuri permittiivisyys mahdollistaa kondensaattorilevyjen lyhyen etäisyyden toisistaan ilman läpilyöntiä..

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

C = kondensaattorin kapasitanssi

Q = suhteellisen varauksen suuruus

V_{ab} = levyjen välinen jännite-ero

A = kondensaattorien levyjen pinta-ala

d = kondensaattorin levyjen etäisyys

Kaavasta voidaan todeta ohuemman eristemateriaalikerroksen mahdollistavan suuremman kapasitanssin. (2, s.182-184; 28, s.35.)

Taulukko 4. Dielektrisyysvakioita

Aine	Suhteellinen permiittivisyys	Läpilyöntikestävyys kV/mm 1mm kerros
Ilma	1,0006	4,7
Lasi	7	15
Paperi	5	15 – 30*
Polyeteeni (PE)	2,3	18
Polystyreeni (PS)	2,6	20...28
Polyvinyylikloridi (PVC)	4,6	25

5.1.4 Puolijohdemusteet

Orgaaniset puolijohdemusteet ovat herkkiä epäpuhtauksille kuten kosteudella ja valolle. Herkkydestään johtuen puolijohdemusteita joudutaan suojaamaan erilaisilla liuottimilla, jotka parantavat myös osaltaan musteen liikkuvuutta. Näiden heikkouksien takia musteen ominaisuuksia ei voida muokata sopimaan kaikkiin tuotantomenetelmiin, sillä aineen rakenteen muuttaminen vaikuttaa suuresti sen kontaminaatoriskiin taikka sen sähköiseen toiminnallisuuteen. Puolijohdemusteita käytettäessä onkin valmistusmenetelmä valittava halutun ominaisuuden mukaan. Tämä rajoittaa painamista ja sekä hankaloittaa prosessin etenemistä. (26,s.9; 28, s.36-39.)

Painettavalla elektroniikalla pyritäänkin usein valmistamaan ainoastaan tuotteen passiiviset osat, joille voidaan esimerkiksi liimata aktiiviset komponentit ja täten aikaansaada kokonaisia piirejä. Komponenttien liittäminen painettuun pintaan on esitelty myöhemmin. (26,s.9; 28, s.36-39.)

Painettavan elektroniikan käyttöä puolijohderatkaisuissa rajoittaa sen rajallinen erottelukyky. Kuten taulukosta 2 voimme todeta, että erottelukyky on keskimäärin 50-100 μm . Tämä rajoittaa esimerkiksi orgaanisten transistorien toimintaa, sillä transistorin kytkentänopeus on 1-10 Hz käytettäessä 50-100 μm kanava- ja johdinpituuksia.

Kytkeä nopeus on 3-4 kertaa huonompi kuin perinteisillä valmistustekniikoilla. (26, s.9; 28, s.36-39.)

5.2 Johtavat polymeerit

Painettavien polymeeri-musteiden johtavuus perustuu usein polymeerien ja polymeerejä koossapitävän väliaineen johtavuuteen tai johtavien polymeerien levinneisyyteen ei-johtavalla pinnalla. Nämä kaksi ilmiötä kuvaavat kahta mahdollisuutta tuottaa johdettua painettavalle pinnalle. (2, s.178.)

Johtavissa polymeereissä sähköjohtavuus perustuu polymeeriketjusta poistetun elektronin synnyttämään positiiviseen varaukseen eli polymeeri on hapetettu. Varaus aiheuttaa elektronien siirtymisen siihen jostain osasta polymeeriketjua aiheuttaen taas uuden varauksen elektronin lähtökohtaan, jolloin ilmiö tapahtuu uudelleen.

Johtavat polymeerit muodostavat konjugoituneita rakenteita mahdollistamaan elektronien luovuttamisen sidoksesta pois, sillä polymeereissä oleva kaksoissidos pyrkii muuttumaan yksittäissidokseksi. Näin varaus pystyy kulkemaan pitkin polymeeriketjua ja myös siirtymään ketjusta toiseen.

On kuitenkin huomioitava, ettei polymeerien sähköjohtokyky ole metallien tasolla johtuen varauksenkuljettajien tarpeesta ”hyppiä” ketjusta toiseen (11). Taulukossa 5 on esitetty kuparin, hopean ja johtavana polymeerinä käytettävän PEDOT:PSS:n johtavuudet.

Taulukko 5. Kuparin, hopean ja polymeerin johtavuus

	Kupari	Hopea	PEDOT:PSS
Johtavuus (S/m)	$59,6 \cdot 10^6$	$63,01 \cdot 10^6$	400

Johtavien puolijohteiden osalta käytetyimpiä musteita ja pinnoitteita ovat johtavat polymeerit kuten poly (3,4-ethylene dioxithiophene), seostettuna polystyreeni sulfaatilla,

(PEDOT:PSS) ja polyaniliini (PANI). Näitä johtavia polymeerejä käytetään johdinten valmistukseen sekä tarvittaessa muodostamaan antistaattisen suojauksen. Antistaattisen suojaukseen johtavat polymeerit ovat hyviä johtuen niiden suhteellisen heikosta johtavuudesta. Tällöin varaus purkautuu hitaasti eikä suuria vahinkoja pääse syntymään.

5.2.1 PEDOT:PSS

PEDOT:PSS on polymeerinen sekoitus kahta eri ionomeeria. Yksi osamateriaalista on valmistettu natriumpolystyreenisulfaatista (PSS), joka on sulfanoitu polyesteri. Osasta sulfonirakennetta on deprotonoitu eli molekyylistä on poistettu yksi (H^+) protoni. Tämä aiheuttaa sen negatiivisen varauksen. Toinen osa materiaalista on poly(3,4-etyleenidioksiopheemiä) (PEDOT), joka on konjugoitua polymeeriä ja jolla on positiivinen varaus.

Yleisemmin tämä sekoitus yhdistetään veteen muodostamalla hyytelömäistä nestettä, taikka erityyppisiä musteita. Vesipohjaisia musteita käytetäänkin pääosin nopeissa painotekniikoissa, kuten esimerkiksi fleksopainossa, syväpainossa ja mustesuihkutekniikassa. Propyleeniglykolipohjaisia musteita käytetään korkeampaa viskositeettia ja pidempää kuivumisaikaa vaativissa tekniikoissa kuten seripainossa. (16)

Yleisimpiä tuotemerkkejä ovat Clevios, AGFA Oragon.

5.2.2 PANI

Polyaniliini PANI on Suomessa kehitetty johtava polymeeri. Se on rakenteeltaan yksinkertaisempi, kestävämpi ja huoneolosuhteissa stabiilimpi kuin muut johtavat polymeerit valmisteet.

Polyanilii sekoitetaan osittain liukoisiin orgaanisiin liutaottimiin tai veteen ja näin ollen sitä voidaan käsitellä painomusteen tavoin. Sekoitusta muuttamalla saadaan sopimaan kaikkiin painotekniikoihin. (29:30, s.29-31)

Yleisimpiä tuotemerkkejä ovat Panipol CX, Panipol DX ja Panipol W

5.3 Erilaiset mustevaatimukset

Eri tekniikoissa käytettävät musteet eroavat toisistaan pääosin viskositeetin, partikkelikoon tai käytettävän liuottimen osalta. Esimerkiksi mustesuihkutekniikassa käytetään korkean viskositeetin omaavia musteita (2-25cPs, veden viskositeetti 1cPs). Tämä johtuu mustesuihkussa käytettävästä tekniikasta, joka vaatii musteen ”lennättämisen” suuttimelta painopinnalle. Tässä tekniikassa myös partikkelien fyysinen koko on erittäin kriittinen, sillä liian suuri partikkelikoko saattaa aiheuttaa suuttimen tukkeutumisen. Tämän välttämiseksi mustesuihkutekniikassa käytetään aukon suhdetta 50:1 partikkeliin. Mustesuihkutekniikka vaatii myös musteelta hyviä pintajänniteominaisuuksia varmistamaan pisaran koossa pysymisen lennon aikana.

Flekso- ja syväpainotekniikoissa viskositeetin osalta nesteen täytyy olla ”juoksevaa”, jotta neste siirtyisi painosylinterin kennoihin ja kennoista painopinnalle. Toisin kuin mustesuihkutekniikassa musteen pintajännitteen tulee olla tarpeeksi alhainen, jotta se kastelee kennon kokonaisuudessaan. Seripainotekniikassa musteen on oltava viskositeetiltaan korkeampaa, jotta se säilyttäisi painossa syntyneen muodon. (2, s.187-189.)

5.4 Substraatit

Tärkeä osa painetun elektroniikan roolista ovat joustavat substraatit, jotka mahdollistavat tuotantotehokkuuden ja mekaanisesti joustavien tuotteiden valmistuksen. Täten käytetyimpiä materiaaleja ovatkin erilaiset taipuisat polymeerit. On kuitenkin huomioitavaa, että polymeerien käyttöön liittyy rajallinen lämmönkestävyys, sillä useat polymeerit sulavat taikka muuttavat muotoaan korkeissa lämpötiloissa. (26, s.7.)

Tämän hetkisen teollisuuden suurin mielenkiinto on kuitenkin kohdistunut paperin käyttöön alustamateriaalina. Paperi mahdollistaa taipuisan tuotteen valmistuksen

verrattain halvemmalla kuin vastaavat polymeerivalmisteet. Huomioitavaa ovat paperin pintaominaisuudet sen karheuden osalta ja huokoisuuden osalta. Nämä tekijät rajoittavat sen käyttöä painettavassa elektroniikassa. (26, s.7; 27, s.27.)

Mustesuihku- ja seripainotekniikan hyödyntäessä vielä pitkälti jäykkiä materiaaleja kuten lasia ja piitä, on massatuotannossa käytössä rotaatioperiaatteen mukaisesti lähes yksinomaan kalvoja ja paperia.

Massatuotannossa käytetään muovisovelluksissa pääasiallisesti polyetylenitereftalaatti (PET) -kalvoja niiden taloudellisuuden takia, mutta polyetyleeninaftaleeni (PEN)- ja polyimide (PI) -kalvoja käytetään ratkaisuihin, jotka vaativat korkeampaa lämmönkestävyyttä. Muita kriittisiä ominaisuuksia ovat materiaalien pinnan tasaisuus ja suotuisa vettyvyys, jota voidaan mahdollisesti muuttaa erilaisin metodein kuten pinnoitteilla. Toisaalta huomattava imukykykin on haitaksi. Johtuen materiaalin edullisuudesta ja moninaisista sovellusmahdollisuuksista, paperi on käytetyin ja kiinnostavin substraatti painetussa elektroniikassa.(13; 14; 26, s. 7.) Taulukossa 6 on esitetty PETin, PENin ja PI:n mekaanisia ominaisuuksia. (13)

Taulukko 6. PETin, PENin ja PI:n ominaisuuksia

Materiaali	PET	PEN	PI
Kemiallinen kestävyys			
Happot väkevöitetty	Hyvä-Huono	Hyvä-Huono	Huono
Happot laimennettu	Hyvä	Hyvä	Välttävä
Alkoholit	Hyvä	Hyvä	Huono
Emäten	Huono	Hyvä	Huono
Rasvat ja Öljyt	Hyvä	Hyvä	Hyvä
Halogeenit	Välttävä-Huono	Hyvä	Huono
Sähköiset ominaisuudet			
Dielektrisyys vakio (1Mhz)	3.0	3.2	3.4
Läpilyöntikestävyys (kV/mm)	17	16 (0.075mm)	22
Neliöresistiivisyys (Ω/\square)	10^{13}	14^{14}	10^{16}
Mekaaniset ominaisuudet			
Kitkakerroin	0.2 - 0.4	0.27	0.42
Kovuus - Rockwell	M94-101		E52-99
Vetolujuus (MPa)	80	200	70 - 150
Fyysiset ominaisuudet			
Tiheys (g/cm^3)	1.3 - 1.4	1.36	1.42
Veden absorptio 24h (%)	0.1		0.2 - 2.9
Taitettavuus %	36		30
Kutistuminen (%)	4 (100°C)	0,8 (5min 180°C)	38 (180°C)

5.4.1 PET

Polyetyleenitereftalaatti eli PET on yleisimmin käytetty kestopuovi, ja sitä kutsutaan useimmin pelkästään polyesteriksi. PET on ominaisuuksiltaan sitkeää, kovaa ja kestävää materiaalia, jonka fysikaalinen muuttumattomuus on hyvä. Kuten taulukosta 5 voidaan todeta, että se absorptio todella vähän vettä ja on hyvin fysikaalisen muotonsa pitävää materiaalia.

Polyetyleenitereftalaattista käytetäänkin useimmin tuotenimikkeitä Mylar, Melinex ja Hostaphan. Varsinkin Mylar®-type polyetyleenitereftalaattikalvoja käytetään kondensaattoreissa sekä muissa graafisissa sovelluksissa. (13: 14)

Yleisimpiä tuotemerkkejä ovat Arnite, Dacron, Hostaphan, Impet, Melinar, Melinex, Mylar, Rynite, Terylene ja Trevira.

5.4.2 PEN

Polyetyleeninaftaleeni (naftaleeni) eli PEN vastaa kemiallisilta rakenteeltaan pitkälti PET:iä, mutta se on kuumaa kestävämpi materiaali. Verrattaessa materiaalia PET:iä voidaan todeta, että PEN alkaa kutistua vasta 190°C:ssa kun taas PET:lle on ominaista kutistua jo 150 °C lämpötilassa.

Taulukosta 5 voidaankin päätellä, että PEN on kuitenkin huomattavasti parempi eristeominaisuuksiltaan, vetolujuudeltaan ja kemialliselta kestävyydeltään verrattaessa PETin. On kuitenkin huomioitavaa, että PEN maksaa huomattavasti enemmän ja sen joustavuuden rasituskestävyys on lyhyempi. (13)

Yleisimpiä tuotemerkkejä ovat Kaladex ja Kalidar.

5.4.3 PI

Polyimidi PI on materiaali, jolla on loistava kuumuudenkesto (noin 300 °C) ja resistiivisyysominaisuudet, mutta on huomioitava sen korkea vedenabsorptiokyky. Tämä johtaa materiaalin heikkoon nesteiden kestäkykyyn, joka ilmenee taulukossa nestemäisten aineiden kuten emästen, happojen ja alkoholien kestämyytenä. Laajalti käytetty muoto on Kapton®-kalvo, joka soveltuu erinomaisesti kondensaattoreiden, eristeiden ja painettavan elektroniikan tuottamiseen. (13; 15) Tuote on kuitenkin hinnaltaan moninkertainen verrattaessa PETin taikka PENin.

Yleisimpiä tuotemerkkejä ovat Kapton, Kinel, Upilex, Upimol ja Vespel.

5.4.4 Paperi

Paperi on materiaali, joka mahdollistaa painettavan elektroniikan tuottamisen edullisesti, joustavasti ja ympäristöystävällisesti. Paperi soveltuukin hyvin kaikkiin käytössä oleviin painotekniikoihin ja on täten ideaali substraatti painetulle elektroniikalle.

Materiaaliselta olemukseltaan paperi ei kuitenkaan vastaa täysin polymeerisiä tuotteita, sillä paperin pinta on polymeerisiä tuotteita huomattavasti karheampi sekä sen kyky imeä painoväriä on huomattavasti parempi. Paperin ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä erilaisia pinnoitteita ja kemikaaleja joilla vaikutetaan paperin absorptiokykyyn ja pinnan ominaisuuksiin. (26, s.7; 27, s.27 - 28)

Substraattina paperia käytetään useimmin painettaessa tuotteita suoraan pakkausmateriaaleihin taikka valmistettaessa RFID-tunnisteita.

5.5 Pinnoitteet

Pinnoitteella tarkoitetaan materiaalia, joka on lisätty tuotteen pintaan. Useimmin erilaisilla pinnoitteilla pyritään parantamaan tuotteen pintaominaisuuksia, kuten adheesiota, veden absorptiota (vettyvyyttä), korroosiokestävyyttä taikka muita sähköisiä ominaisuuksia kuten pinnan resistiivisyyttä ja johtavuutta.

Pinnoitteet sisältävät useimmin orgaanisia aineita kuten savea paperinpainossa tuottamaan tasaisemman painopinnan taikka johtavia polymeerejä, joilla voidaan tuottaa antistaattisia taikka johtavia pintoja. (12.)

6 Komponenttien liittäminen

Tässä osiossa esitellään kolme eri tekniikkaa, jotka mahdollistavat komponenttien liittämisen painetulla elektroniikalla tuotettuun pintaan.

6.1 Johtavat liimat

Johtavat liimat ovat komposiittimateriaaleja eli seosteuttuja polymeerejä, joiden päätehtävänä on tarjota mekaanien liitos kahden eri pinnan välillä ja muodostettaa sähköinen silta näiden välille. Tämä kaksiosainen toiminto saadaan aikaan polymeerisideaineilla ja johtavilla partikkeleilla. Sidosaineet tarjoavat liitokselle mekaanisen lujuuden ja johtavat partikkelit varmistavat sähköjohtumisen. (22.)

Johtavilla liimoilla pyritään korvaamaan perinteisten juotteiden käyttöä ja täten välttämään juotteissa yleisesti käytettävää tinaa. Johtavilla liimoilla on etunaan myös matalampi kovettumislämpötila 80–140 °C verrattaessa useimpiin juotteisiin joiden kovettuminen tapahtuu 220–240 °C lämpötilassa. (22.)

Yleisimmin käytetyt johtavat liimat sisältävät hopeapartikkeleilla seostettua epoksia, mikä tarjoaa paremman joustavuuden sekä matalamman resistiivisyyden verrattaessa

lyijyttömiin pastoihin. Muita käytettyjä johtavia partikkelimetalleja ovat kupari, kulta, alumiini, nikkeli ja platina. (22.)

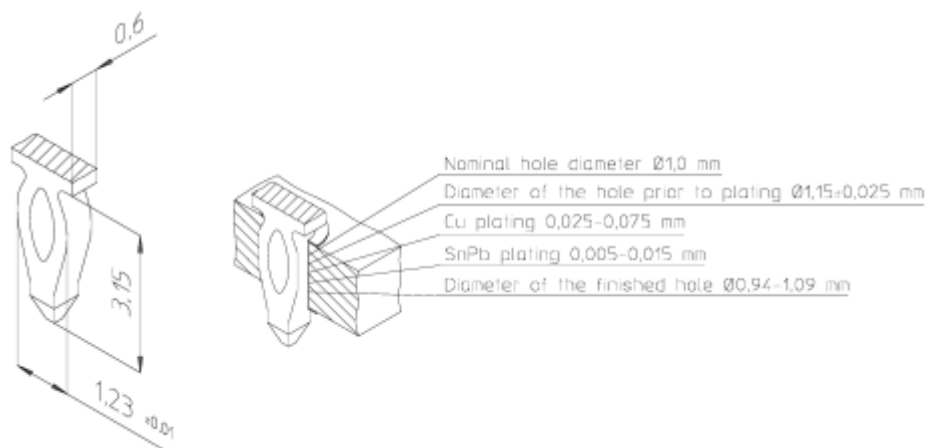
6.2 Juotospastat

Joutepasta muodostuu kolmesta toiminnallisesta osasta: metallipartikkeleista, kantoaineesta ja fluksista. Näillä jokaisella on oma toiminnallinen tehtävä. Metallit muodostavat metallurgisen sidoksen pintojen välille. Kantoaineen tehtävänä on ylläpitää pastan muotoa ja fluksin tehtävänä puhdistaa liitettävät pinnat sekä parantaa juotteen pintajännitystä. (22.)

Painettavassa elektroniikka tuotannossa käytetäänkin matalanlämpötilanpastoja, jotka mahdollistavat matalan prosessilämpötilan. Matalan lämpötilan pastat sulavat alle 183 °C:en . Useimmat pastat sisältävät tinaa, vismuttia, kadmiumia, indiumia ja lyijyä. (22.)

6.3 Press-fit

Press-fit-prosessi perustuu komponenttien jalkojen puristavaan voimaan sovelluksessa. Prosessi on helppo teoreettisesti ja käytännössä. Kuvassa 13 on esitetty Press-fit-tekniikalla painettu liitos.



Kuva 13. Press-fit-liitos (23)

Press-fit vastaa periaatteeltaan niittausta, jossa rakenteeltaan ylimitoitettut liitospinnit painetaan päällystettyjen PWB-reikien läpi.

Press-fit-niittaus takaa nopean, tehokkaan ja luotettavan prosessin. Se mahdollistaa prosessin suorittamisen huoneen lämmössä, antaen lisää materiaalisia mahdollisuuksia verrattaessa juotos- taikka liimausmenetelmiin. Menetelmä tarjoaa myös hyvät sähköiset ominaisuudet ja on ennen kaikkea ympäristöystävällisen prosessin. (22)

7 Kontaktien luonti

Yhtenä osana työtä oli mahdollisten kontaktien luominen tuotetoimittajiin. Kontaktien luominen osoittautui hankalammaksi kuin oli odotettu. Kontaktipyyntöihin ei suurimalta osalta vastattu lainkaan tai annettiin ymmärtää, ettei tilauskannalla ole merkityksellistä hyötyä toimittajalla, jotta tämän kannattaisi nähdä enempää vaivaa tuotteen esittelyyn. On kuitenkin huomioitavaa ettei kaikissa tapauksissa käynyt näin. Luodut ja yritetyt kontaktiyhteydet on esitetty liitteessä 1.

8 Yhteenveto ja jatkokehitysmahdollisuudet

Painettu elektroniikka tekniikkana sisältää suunnattoman paljon tärkeitä parametreja ja käsitteitä, joiden kaikkien läpikäynti olisi tehnyt selvitystyöstä turhan raskaan. Työssä pyrittiinkin selvittämään asia yleisellä tasolla, tuottamaan tarpeellisen tietopohjan jatkoselvityksiä varten, sekä luomaan kiinnostuneelle lukijalle tietopohja painettavasta elektroniikasta.

Vaikka painettua elektroniikkaa on tutkittu jo useampia vuosia, ei siitä ole olemassa helppokäsitteistä opasta, joka pohjustaisi lukijalle tekniikan toimintaa. Markkinoilla olevat painokset vaativat usein lukijalta huomattavaa tietoa tekniikasta jo etukäteen, sillä tekniikka sisältää sekä paino- kuin sähköoppia, että kemiaa.

Tämä opinnäytetyö selventää lukijalle painetussa elektroniikassa käytettävät materiaalit ja tekniikat yleisellä tasolla ja se vastaa kysymyksiin: mitä on painettu elektroniikka ja miten painettua elektroniikkaa valmistetaan. Selvitys on pyritty suuntaamaan henkilölle joka on kiinnostunut alasta ja kaipaa helppolukuista materiaalia asiasta. Selvitystyö toimii hyvänä pohjana aloitettaessa painetun elektroniikan jatkotutkimuksia luoden lukijalle tarpeellisen pohjan alan tekniikoista ja materiaaleista.

Jatkokehitysmahdollisuuksia painetun elektroniikan alalla on lähes rajattomasti. Se onkin jatkuvasti kehittyvä tekniikan ja talouden ala, johon kannattaisi panostaa opetusta ja oppilasprojekteja nykyistä enemmän. Yhtenä mahdollisena jatkokehitystyönä voidaan pitää tutkimusta peruskomponenttien ja painetun elektroniikkapinnan liittämisestä. Myös RFID antennien valmistaminen painotekniikalla olisi tutkimisen arvoinen asia, joka mahdollistaisi perinteisen radiotaajuusopin yhdistämisen elektroniikkatuotantoopin kanssa. Tämä loisi oppilaille mahdollisuuden toimia teollisuuden tavoin vastuullisena niin tuotannosta kuin suunnittelustakin.

Yhtenä kehitysmahdollisuutena voisikin olla paperisten painoalustoiden kokeilu RFID-tunnisteiden pohjana. Tutkimuksen pääpainona voitaisiin pitää tulevaisuuden maitopurkkeja ja täten selvittää niissä käytettävien musteiden ja painoalustoiden olosuhdekestävyyksiä.

Lähteet

1. Hagen, Klauk. Organic Electronics. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2008.
2. Gamotam, Daniel R & Brazis, Paul & Kalyanasundaram, Krishna & Zhang, Jie. Printed organic and molecular electronics. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2004.
3. Wong, William S & Salleo, Albero. Flexible Electronics. New York: Springer, 2009.
4. Ojanperä, Veijo. Komponentteja tulostamaan. Helsinki: Proessori, 12/2009.
5. Fabrius, Tapio & Jantunen, Heli & Kopola, Harri & Jabbour, Ghassan & Hast, Jukka & Popov, Alexey & Sliz, Rafal & Alarousu, Erkki & Lappalainen, Jyrki & Kordas, Krisztia & Maaninen, Arto & Hakola, Elina & Myllylä, Risto. Kaasuanturi syntyy painokoneella. Helsinki: Proessori, 12/2009.
6. Gravure as an industrially viable process for printed electronics. (WWW-dokumentti) University of California at Berkeley.
<www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-70.html> 2008.
Luettu 20.12.2009.
7. Viluksela Pentti. Painotekniikka Osa 2. opetusmateriaali.
<<http://www.evtek.fi/n/penttiv/paino2i/index>> Evtek-ammattikorkeakoulu
8. Printing with nanotechnology. (WWW-dokumentti) Nano print technologies.
<<http://www.nanoprinttech.com/old/index.html>> Luettu 25.1.2010.
9. Permittiivisyys. (WWW-dokumentti) wikipedia.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Permittiivisyys>> Luettu 13.4.2010.

10. Sähkönjohtavuus nanotieteessä. (WWW-dokumentti) Jyväskylän yliopisto.
<<http://nanokoulu.jyu.fi/verkkokurssi/aineen-rakenne-ja-sahkonjohtavuus>>
Luettu 13.4.2010.
11. The 2000 Nobel Prize in Chemistry: Information for the Public (WWW-dokumentti) Nobel e-Museum.
<http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/public.html>
Luettu 13.4.2010.
12. Coating. (WWW-dokumentti) wikipedia.
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Coating>> Luettu 14.4.2010.
13. Polymer (WWW-dokumentti) Goodfellow Cambridge Ltd.
<<https://www.goodfellow.com/homee.aspx?LangType=2057>> Luettu 11.4.2010.
14. Polyethylene terephthalate (WWW-dokumentti) wikipedia.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyetglyene_terephthalate> Luettu 13.4.2010.
15. Polyimide (WWW-dokumentti) wikipedia.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyimide_Film> luettu 13.4.2010
16. PEDOT:PSS (WWW-dokumentti) wikipedia
<http://en.wikipedia.org/wiki/Baytron_P> Luettu 21.4.2010.
17. RFID UHF Antenna Concept (WWW-dokumentti) Atotech.
<<http://www.atotech.com/en/products/electronics/alternative-process-technologies/rfid-uhf-antenna-concept.html>> Luettu 18.4.2010.
18. Kotilainen Samuli. Mullistava tehdas tulostaa elektroniikkaa. Helsinki.
Tietokone. 3/2007.

19. Leidenius, Kim. Suomi tekemään taipuisaa elektroniikkaa. Helsinki Prosessori. 4/2008.
20. An Introduction to Printable & Flexible Electronics (WWW-dokumentti) Polyera. <<http://www.polyera.com/technology/>> Luettu 26.4.2010.
21. Flora, Li. Fabrication and stability of high deposition rate, low temperature deposited ZnO TFTs. Luentomoniste. University of Cambridge. 2009.
22. Salminen, Hanna-Maija. Komponenttien liittäminen painettavaan elektroniikkaan. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2009.
23. Press-fit specs and Press-fit tools (WWW-dokumentti) Valukumpu Oy. <<http://www.valukumpu.fi/fi/tuotteet/liittimet/datalehdet/>> Luettu 26.4.2010.
24. Gilleo, Ken. Polymer thick film. New York: Van Nostrand Reinhold. 1996.
25. Processing guide for printing rfid antennae (WWW-dokumentti) Dupont. <http://www2.dupont.com/MCM/en_US/assets/downloads/prodinfo/RFID_ProcessingGuide.pdf> Luettu 28.4.2010.
26. Jokiharju, Tuomas. Mustesuihku prosessin optimointi painettavan elektroniikan valmistuksessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2007.
27. Merilampi, Sari. RFID-tunnisteantennien valmistustekniikat ja paperille painettujen tunnisteiden arviointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2006.
28. Tuominen, Vesa. Orgaaniset puolijohteet painettavassa elektroniikassa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2009.

29. Mäkelä, Tapio. Towards printed electronic devices. Doctoral deissertation. Åbo Akademi University. 2008.
30. Turunen, Kimmo Polyaniliini muuttuu moneksi. VTT. Impulssi. 1/2007

Kontaktit (käsittää yhtiö joihin on otettu yhteyttä opinnäytetyöhön liittyen)

Panipol Oy

Jukka Perento
Managing Director
jukka.perento@panipol.com

PChem Associates Inc

Michael Mastropietro
R&D Manager
mmastro@nanochem.com

Perel Oy

Jari Honkanen
Osastopäällikkö
jari.honkanen@perel.fi

Wurht Elektronik

jaakko.liimatainen@wurthelektronik.fi

Acreo

luotu kontakti pyyntö

Novalia

info@novalia.co.uk

DuPont

luotu kontakti pyyntö

AGFA

luotu kontakti pyyntö

Tekra

luotu kontakti pyyntö

Conductive Circuits Inc

edrobers@conductivecircuits.com

Atotech

luotu kontakti pyyntö

Goodfellow

info@goodfellow.com

Polyera

info@polyera.com

E ink

luotu kontakti pyyntö

Think & Tinker Ltd.

support@thinktink.com

Xymara

luotu kontakti pyyntö

Ntera

info@ntera.com

Vorbek

luotu kontakti pyyntö