

Aregaw Kujansuu

# TULOSTETTAVAN VARAUSVAHVISTI- MEN LÄMPÖTILARIIPPUUS

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Marraskuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Aregaw Kujansuu: Tulostettavan varausvahvistimen lämpötilariippuvuus  
Engl. Temperature dependency of printed charge amplifier  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintyö  
Marraskuu 2022

---

Suoratulostusteknologia tarjoaa edullisen ja ympäristöystävällisen tavan valmistaa elektroniikkatuotteita. Toisin kuin perinteiseen litografiaan perustuva valmistusmenetelmä, suoratulostusteknologia kuluttaa hyvin vähän materiaaleja, prosessointilämpötilat ovat alhaiset ja prosessivaiheita on vain murto-osa edellä mainittuun menetelmään verrattuna. Tämän lisäksi, suoratulostusteknologia on hyvin joustava käytettävien alustamateriaalien ja niiden pinnan muotojen suhteen. Suoratulostusteknologioista mustesuihkutulostus on kehittynein ja sen käyttö onkin yleistynyt niin koti- kuin kaupallisissakin sovelluksissa. Mustesuihkutulostus soveltuu erityisesti prototyyppien nopeaan luomiseen, sillä haluttu piirikaavio toteutetaan digitaalisesti maskien sijasta. Näin ollen, alkuperäisiin suunnitelmiin tehdyt muutokset tai lisäykset ovat siten välittömästi toteutettavissa ilman, että tuotantoprosessi viivästyisi uusien maskien valmistamisen takia.

Tässä työssä tutkittiin kahta biosignaalien mittaamiseen suunniteltua orgaanista varausvahvistinnäytettä. Näytteet koostuivat orgaanisesta pseudo-CMOS-invertteristä, johon oli integroitu biasointivastus, takaisinkytkentävästus ja takaisinkytkentäkondensaattori. Työn tarkoituksena oli määrittää näytteiden lämpötilariippuvuus altistamalla ne kahdeksalle eri lämpötila-arvolle huone-lämpötila mukaan lukien. Mittausdatan perusteella laadituista kuvaajista selviää, että lämpötilalla on ilmeistä vaikutus näytteiden suorituskykyyn. Lämpötilan muutos vaikuttaa erityisesti orgaanisten komponenttimateriaalien sähköisiin ominaisuuksiin. Matalissa lämpötiloissa vastus- ja puoli-johdemateriaaleissa varauksenkuljettajat ovat lokalisoituneet energialoukkuihin eivätkä siten osallistu varauksen kuljettamiseen. Eristemateriaalissa vastaavasti dipolimolekyylit eivät pääse kääntymään sähkökentän suuntaisesti vähäisen energian takia. Siispä lämpötilan noustessa energialoukussa olevien varauksenkuljettajien ja dipolimolekyylin liikkuvuus paranee lisääntyneen lämpöenergian ansiosta.

Lämpötilariippuvuus on sitä merkittävämpi, mitä enemmän materiaalissa on epäpuhtauksia sekä epäsäännöllisyyksiä tai rakennevirheitä mikro- ja makrorakenteessa, sillä ne lisäävät varauksenkuljettajia sitovien ”energialoukkujen” määrää. Lämpötilariippumattomuutta voidaan parantaa hienosäätämällä materiaalien molekyyli-rakennetta syntetisoinnin aikana, optimoimalla valmistusprosessien parametrit ja materiaalivalinnat sekä toteuttamalla valmistusprosessi inertissä ympäristössä. Tällöin kuitenkin materiaali- ja valmistuskustannukset saattavat nousta epäsuorasti.

Avainsanat: Lämpötilariippuvuus, mustesuihkutulostus, orgaaninen varausvahvistin, suoratulostusteknologia, tulostettava elektroniikka, varausvahvistin.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnalle Mika-Matti Laurilan tutkimustyön innoittamana syksyllä 2022.

Haluan esittää lämpimät kiitokseni ohjaajalleni, Matti Mäntyselälle. Hänellä on riittänyt kärsivällisyyttä ja ymmärrystä työn viivästymisen suhteen, minkä lisäksi hän on vastannut viipymättä kaikkiin kysymyksiini kiireistään huolimatta.

Haluan kiittää myös Mika-Matti Laurilaa mittauslaitteistoon ja mittausprosessiin perehdyttämisestä. Lämpimät kiitokseni myös sisarelleni, joka on ollut henkisenä tukena ja siten edesauttanut työn loppuun saattamisessa.

Tampereella, 01.11.2022

Aregaw Kujansuu

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. MUSTESUIHKUTULOSTUS .....	2
2.1 Jatkovakiertoinen mustesuihkutulostin .....	3
2.2 Drop On Demand – mustesuihkutulostin .....	5
2.3 Lämpömustesuihkutulostin .....	6
2.4 Pietsosähkömustesuihkutulostin .....	7
2.5 Sähköhydrodynaaminen mustesuihkutulostin .....	9
3. INVERTTERI .....	13
3.1 Toimintaperiaate .....	13
3.2 MOS – invertterit .....	14
4. VARAUSVAHVISTIMEN LÄMPÖTILAKÄYTTÄYMISSÄ MÄÄRITYS .....	17
4.1 Mitattu orgaaninen varausvahvistin .....	17
4.2 Mittauksen toteutus .....	18
4.3 Mittaustulokset .....	20
4.4 Mittaustulosten analysointi .....	23
5. YHTEENVETO .....	26
LÄHTEET .....	27

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Engl. Alternating current, vaihtovirta
CIJ	Engl. Continuous inkjet, jatkuvakiertoinen mustesuihkutulostin
CMOS	Engl. Complementary metal-oxide-semiconductor, komplementaarinen metalli-oksidi-puolijohde
$D_F$	Engl. Dissipation factor, häviökerroin
DOD	Engl. Drop-on-Demand
EHD	Engl. Electrohydrodynamic, sähköhydrodynaaminen
$\epsilon$	Eristevakio
NMOS	Engl. N-channel metal-oxide-semiconductor, n-kanavainen metallioksidi-puolijohde
P3HT	Engl. Poly(3-hexylthiophene), poly(3-heksyyli tiofeeni)
PMOS	Engl. P-channel metal-oxide-semiconductor, p-kanavainen metallioksidi-puolijohde
PS:DTBDT-C6	Engl. polystyrene, 2,7-dihexyl-dithieno[2,3-d;2',3'-d']benzo[1,2-b;4,5-b']dithiophene; polystyreeni, 2,7-diheksyyli-ditieno[2,3-d;2',3'-d']bentso[1,2-b;4,5-b']ditiiofeeni
RFID	Engl. Radio frequency identification, radiotaajuustunnistus

# 1. JOHDANTO

Perinteinen litografiaan perustuva elektroniikkakomponenttien valmistus on monivaiheinen prosessi, jossa materiaalia lisätään ja poistetaan useaan kertaan ennen lopullista tuotetta. Prosessissa voidaan käyttää jopa tuhansia eri kemikaaleja, joista kuitenkin vain murto-osa on mukana lopullisessa tuotteessa. Monivaiheinen tuotantoketju kuluttaa paljon energiaa sekä uusiutumattomia luonnonvaroja, minkä lisäksi osa tuotantoprosessissa käytetyistä kemikaaleista ovat myrkyllisiä ja siten luontoon päätyessään saastuttavat maaperää. [1]

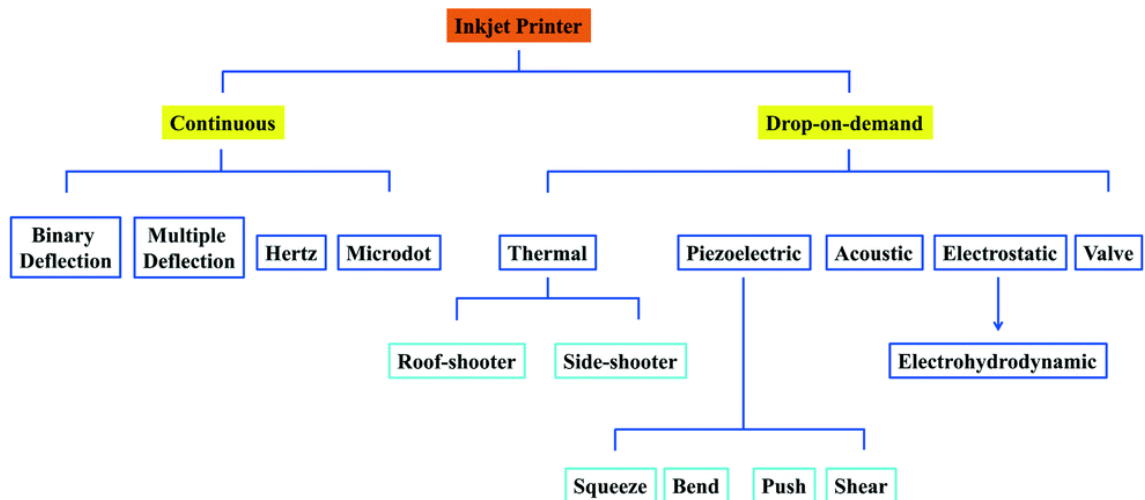
Orgaanisia puolijohdemateriaaleja hyödyntävä suoratulostusteknologia on noussut puoleensa vetäväksi vaihtoehdoksi perinteisille menetelmille niin hintansa- kuin ympäristöystävällisyytensä takia. Alhaiset prosessointilämpötilat sekä mahdollisuus toteuttaa erilaisiin alustamateriaaleihin tai pinnan muotoihin, tekee suoratulostusteknologiasta joustavan ja sitä voidaanakin hyödyntää hyvin laajalla alueella – Lääketieteellisten sovellusten, pakkausteollisuudessa RFID-tunnisteiden, vaateteollisuudessa älyvaatteiden tai tehotuotannossa aurinkokennojen valmistamiseen.

Orgaanisista materiaaleista valmistetut sovellukset ovat kuitenkin epästabiileja ja herkkiä ympäristön olosuhteille verrattuna epäorgaanisilla materiaaleilla valmistettuihin sovelluksiin. Tämän työn tarkoituksena onkin tutkia M.-M. Laurilan toimesta valmistetun biosignaalin mittaamiseen suunniteltua orgaanisen varausvahvistinnäytteen lämpötilariippuvuutta [2]. Työssä tutkitut näytteet altistettiin kahdeksalle eri lämpötila-arvolle, jonka jälkeen mittaustuloksista laadittiin luvussa 4.3 esitetyt jännitteensiirtokäyrien ja vahvistusten kuvaajat.

Luvussa 2 on käsitelty mustesuihkutulosteknologian eri järjestelmät sekä niiden edut ja haitat. Luvussa 3 käsitellään vastaavasti invertterin toimintaperiaatteet sekä esimerkkejä käytännön toteutuksesta. Luvussa 4 käydään läpi mitattujen näytteiden rakenne, jonka jälkeen käsitellään mittauslaitteisto ja mittausjärjestely. Lopuksi käydään läpi mittaustulokset sekä analysoidaan tulokset ja mahdolliset keinot suorituskyvyn parantamiseen. Viimeisessä kappaleessa tiivistetään analyysissa tehdyt johtopäätökset mittaustuloksista.

## 2. MUSTESUIHKUTULOSTUS

Toisin kuin perinteinen elektroniikan valmistusmenetelmä, mustesuihkuteknologia ja sekä muut suoratulostusteknologiat mahdollistavat elektroniikan sovellukset erilaisissa materiaaleissa sekä pinnan muodoissa [3]. Näin ollen, suoratulostusteknologialla valmistetut elektroniikan sovellukset ovatkin erittäin ohuita sekä kevyitä ja siten kuormittavat vähemmän ympäristöä verrattuna perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuihin elektroniikan sovelluksiin. Suoratulostustekniikat voidaan jakaa: pisara, energiasäde, virtaus ja kynä/pipetti perusteisiin [4]. Edellä mainituista kategorioista, mustesuihkuteknologia kuuluu ensimmäiseen ja tämä voidaan jakaa edelleen omaan alaluokkiinsa (ks. Kuva 1). Suoratulostusteknologioista mustesuihkutulostaminen on kehittynein ja modernien mustesuihkutulostimien tulostuspäissä voi olla satoja tai jopa tuhansia suuttimia, jotka voivat annostella jopa miljoonia mustepisaroita sekunnissa [5].



*Kuva 1. Mustesuihkuteknologioiden luokittelu. [6]*

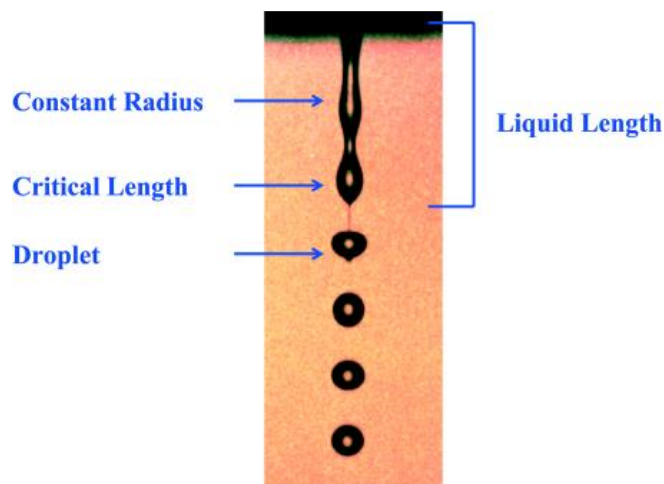
Mustesuihkutulostimissa ja kuten muissakin suoratulostekniikoissa, haluttu piirikaavio toteutetaan digitaalisesti ja alkuperäisiin suunnitelmiin tehdyt muutokset tai lisäykset ovat siten välittömästi toteutettavissa ilman, että tuotantoprosessi viivästyisi uusien maskien valmistamisen takia [5], [7], [8]. Mustesuihkutulostimissa ja muissa useimmissa suoratulostekniikan valmistusprosesseissa, materiaali voidaan sijoittaa suoraan siihen kohtaan kuin lopullisessa tuotteessa sen halutaan olevan eikä lisättyä, materiaaleja ole tarpeen

poistaa jälkeensä. Siten suoratulostekniikka on tuotannon näkökulmasta yksinkertainen ja mahdollistaa esimerkiksi vaivattomasti uusien prototyyppien luomisen. Tämän vuoksi mustesuihkutulostimien käyttö onkin yleistynyt niin koti- kuin kaupallisissakin sovelluksissa [4], [5], [7].

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään lyhyesti mustesuihkujärjestelmien kaksi päätyyppiä ja niiden alaluokat (ks. Kuva 1). Jatkuvakiertoinen mustesuihkujärjestelmä (engl. Continuous inkjet) ja sen alaluokat on esitelty luvussa 2.1. Drop-on-demand (DOD) -mustesuihkujärjestelmä ja sen yleisimmät alaluokat, lämpö- ja pietsosähkömustesuihkujärjestelmä, on esitelty luvuissa 2.2–2.4. Vastaavasti tämän hetken lupaavin, sähköstaattiseen tekniikkaan perustuva DOD-tulostinjärjestelmä, on esitelty luvussa 2.5.

## 2.1 Jatkuvakiertoinen mustesuihkutulostin

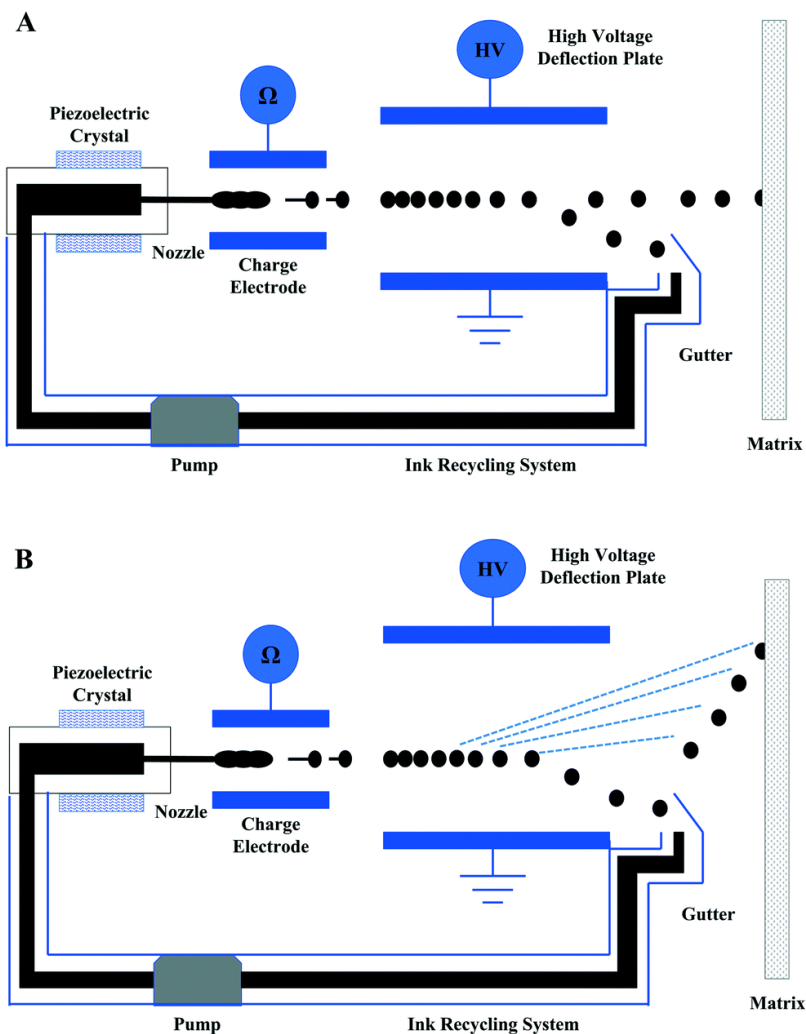
Jatkuvakiertoisessa tulostimessa (continuous inkjet, CIJ), tulostuspään suuttimesta tuleva musteen määrä on vakio koko tulostusprosessin ajan, vaikka tulostin ei tulostaisikaan varsinaisesti mitään. Musteen pumppaaminen suuttimesta ulos on tavallisesti toteutettu pietsosähköisen materiaalin avulla [4]–[6], [9]. Vaihtoehtoisesti, muste voidaan pumpata hyödyntämällä sähköstaattiseen tai lämpöön perustuvaa menetelmää [4], [5]. Tulostimen suuttimesta tuleva nestevirta on epävakaata ja pyrkii hajoamaan pisaroiksi nesteen pintajännityksen vaikutuksen takia, kuten Kuvassa 2 on havainnollistettu [4], [5]. Kyseissä ilmiössä, joka tunnetaan myös Plateau-Rayleigh epävakaussilmionä, nestevirta hajoaa pisaroiksi, kun aaltoilevan nestevirran aallon pituus on noin 4,5 kertaa nestevirran halkaisija. Muodostuneen pisaran halkaisija on noin kaksi kertaa nestevirtauksen halkaisija.



**Kuva 2.** Plateau-Rayleigh epävakaussilmio. [6]



Useimmissa jatkuvakiertoisissa tulostimissa mustepisarat ohjataan alustalle mustepisaroi- ta sähköisesti varaavan elektrodin ja sähkökentän avulla (ks. Kuva 3) [5]. Siihen kohtaan missä nestevirtauksen hajoaminen pisaroiksi tapahtuu, nestevirtauksen ympärille on sijoitettu elektrodi, joka varaa putoavia mustepisaroi- ta sähköisesti elektrodiin ohjatun pulssin mukaisesti [5], [6], [9]. Riippuen mustepisaroiden varauksen suuruudesta, mustepisarat tippuvat joko tulostettavalle alustalle tai takaisin mustesuihkujärjestelmään. CIJ-tulostimissa on käytännössä kaksi erilaista musteen ohjausjärjestelmää: binaari- taitteinen ja monitaitteinen [6], [9]. Binaaritaitteisessa tulostimessa varatut mustepisarat ohjataan takaisin mustesuihkujärjestelmään kierrätettäväksi, kun taas varaamattomat mustepisarat ohjautuvat alustamateriaalille (ks. Kuva 3A). Vastaavasti, monitaitteisessa järjestelmässä, varatut mustepisarat voidaan ohjata alustalle useammasta kulmasta, riippuen mustepisaran varauksen suuruudesta (ks. Kuva 3B).



**Kuva 3.** Binaaritaitteinen (A) ja monitaitteinen (B) CIJ-mustesuikujärjestelmä. [6]

CIJ-tulostimilla on lisäksi kaksi muuta järjestelmää, hertsi ja mikropiste (engl. microdot) [6], [9], jotka eivät varsinaisesti liity musteen ohjaukseen vaan sen sijaan mustepisaroiden koon ja tulostusresoluution säätelyyn. Hertsi-järjestelmässä tulostusresoluutiota voidaan säädellä mustepisaroiden kokoa muuntelemalla. Vastaavasti mikropiste-järjestelmässä suuttimesta voidaan annostella niin isoja- kuin pieniäkin mustepisaroita, joista vain pienimmät pisarat valikoituvat sähkökentän ohjattavaksi joko alustalle tai takaisin mustesuihkujärjestelmään.

Vaihtoehtoisesti elektrodien ja sähkökentän sijasta, mustepisarot voidaan ohjata alustalle hyödyntämällä ilmavirtaa [5]. Kyseissä menetelmässä, isot mustepisarot kulkeutuvat ilmavirran läpi alustalle, kun taas pienet mustepisarot ohjautuvat ilmavirran vaikutuksesta takaisin mustesuihkujärjestelmään. Ilmavirralla toteutettu mustesuihkujärjestelmä on huomattavasti yksinkertaisempi ja eliminoi muun muassa pisaroiden siirtymävirheet, jotka johtuvat häiriösignaaleista ja epätasaisesta sähkökentän voimakkuudesta.

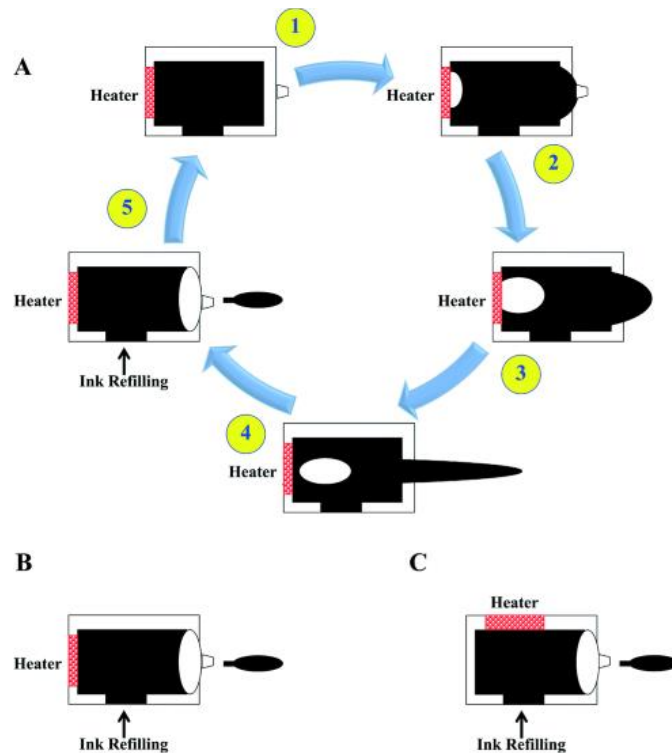
CIJ-tulostimella valmistetun tuotteen resoluutio, eli toisin sanoen pisaran halkaisijan koko alustalla, voi olla 10–120  $\mu\text{m}$ , mutta tyypillisesti tämä on noin 120  $\mu\text{m}$  [4]. Tulostuspään suutin ei myöskään tukkeudu yhtä helposti kuin DOD-tyyppisessä tulostimessa, koska musteen viskositeetti on alhaisempi ja lisäksi mustetta kierrätetään järjestelmässä jatkuvasti [4], [6]. Toisaalta CIJ-tulostimessa käytettäviä musteita pitää pystyä varaamaan, jolloin musteita on rajoitetummin käytettävissä. Yleisesti ottaen, CIJ-tulostinjärjestelmän kustannukset ovat suuremmat tulostimen hankintahinnan ja tarvittavien huolto- toimenpiteiden takia [6].

## 2.2 Drop On Demand – mustesuihkutulostin

Kuten menetelmän nimikin kertoo, DOD-tyyppisessä mustesuihkutulostimessa mustepisaroita annostellaan vain silloin kun niitä tarvitaan [4]–[9]. Näin ollen DOD-järjestelmä on yksinkertaisempi verrattuna CIJ-järjestelmään, koska kertaalleen suuttimesta ulos tulleita mustepisaroita ei ole tarpeen kierrättää mustesuihkujärjestelmässä. Lisäksi DOD-tulostinjärjestelmässä on mahdollista asettaa kullekin tulostuspääsuuttimelle omat tulostusparametrit. Yleisimmät DOD-järjestelmät käyttävät mustepisaroiden annostelussa pietsosähköön tai lämpöön perustuvaa tekniikkaa [4], [7], [8], [10]. Vähemmän käytössä olevat muut DOD-tulostintyyppiä käyttävät sähköstaattiseen, akustiseen tai venttiiliseen perustuvaa tekniikkaa (ks. Kuva 1). DOD-tulostimella valmistetun tuotteen resoluutio on samaa luokkaa kuin CIJ-tulostimella, mutta tyypillisesti tämä on noin 50  $\mu\text{m}$  [4].

## 2.3 Lämpömustesuihkutulostin

Lämpömustesuihkutulostimen toimintaperiaate perustuu musteen nopeaan lämmittämiseen, jolloin lämmön vaikutuksesta musteeseen syntyy ilmakupla, joka työntää mustetta ulos suuttimesta (ks. Kuva 4A). Tulostinpään mustesuihkusäiliössä olevaan lämpöelementtiin ohjattu sähkövirta saa lämpöelementin kuumenemaan niin paljon, että lämpöelementin kanssa kosketuksessa oleva muste höyrystyy ja muodostaa kaasukuplan. Lämpöelementtiin ohjattu lyhytkestoinen sähkövirta nostaa musteen lämpötilan jopa 300–400 °C asteiseksi muutamassa mikrosekunnissa. Musteen lämpötilan nousu on yli  $10^7 \text{ K s}^{-1}$ , eli toisin sanoen lämpötila nousee 100 °C alle kymmenessä mikrosekunnissa. Nopean lämpötilan nousun takia lämpö ei ehdi siirtymään kaikkialle tulostinpään säiliössä olevaan musteeseen vaan höyrystää lämpöelementin pinnan kanssa kosketuksessa olevan musteen, jolloin syntyy kaasukupla. Laajentunut kaasukupla aiheuttaa mustesäiliössä ylipaineen ja tämän vaikutuksesta mustetta työntyy suuttimesta ulos, mikä vastaavasti kumoaa paine-eron mustesäiliössä. Kaasukuplan romahtaminen vastaavasti aiheuttaa mustesäiliöön alipaineen, koska mustetta on nyt vähemmän suuttimesta ulos poistuneen musteen takia. Tämä alipaine imee mustesuihkujärjestelmän mustesäiliöstä tulostinpään säiliöön, jolloin paine-ero tasaantuu jälleen. [5], [6]

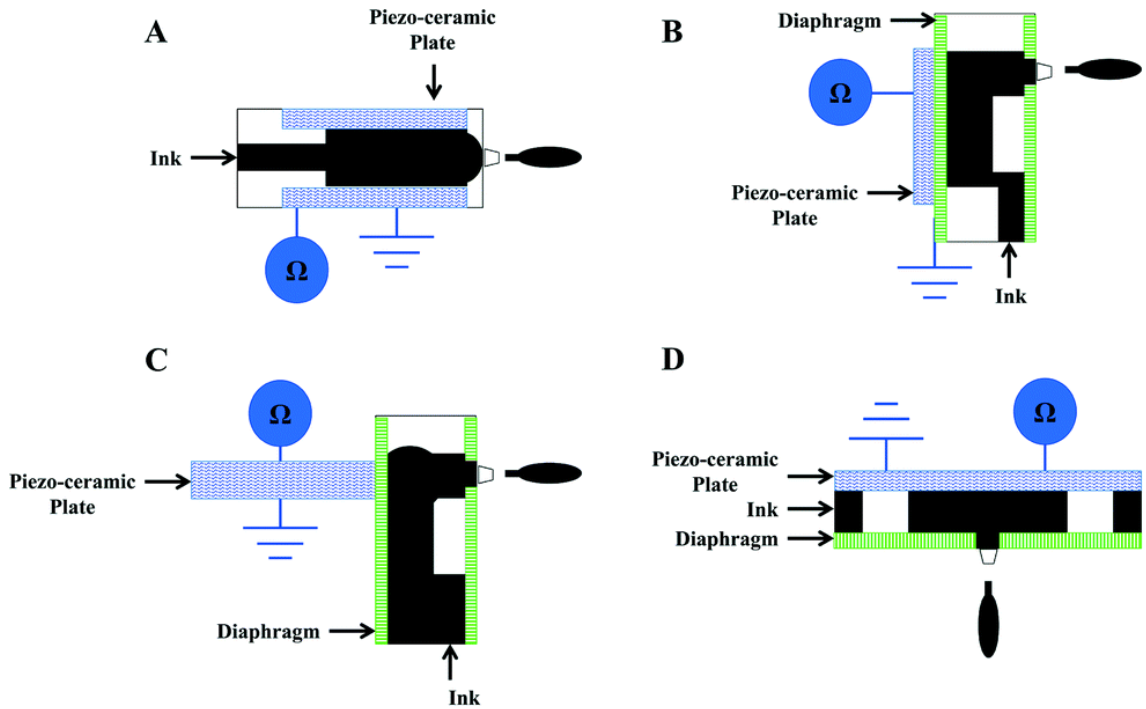


**Kuva 4.** Havainnollistuskuva lämpömustesuihkutulostimen toimintasyklistä (A) sekä kaksi eri tapaa integroida lämmityselementti tulostinpäähän (B-C). [6]

Musteiden käyttö lämpömustesuihkutulostimissa on rajattu, sillä käytettävien musteiden pitää kyetä höyrystymään sekä kestämaan korkeita lämpötiloja [9]. Esimerkiksi polymeeripohjaiset musteet soveltuvat huonosti käytettäviksi lämpömustesuihkutulostimissa, koska korkea lämpötila saattaa vahingoittaa musteen toiminnallisuutta [9]. Vaihteleva lämpö vaikuttaa myös tulostimen osien toimintaikään [5]. Kaasukuplien synnyn ja romahduksen aiheuttaman fyysisen rasituksen takia, lämpöelementin käyttöikä on rajoitettu noin  $10^8$  sykliin. Tämän lisäksi, mustetta saattaa palaa kiinni lämmityselementtiin. Tällöin, lämmityselementtiin kertynyt eristävä kerros palanutta mustetta, saattaa jossain vaiheessa estää kokonaan kaasukuplien syntymisen. Negatiivisten puolien vastapainona, lämpötekniikkaan perustuvat mustesuihkutulostimet ovat sekä edullisia että nopeita. Edellisen lisäksi, niillä voi olla erittäin tiheästi suuttimia, jotka voivat annostella tilavuudeltaan 150–200 pl:n suuruisia mustepisaroita [6].

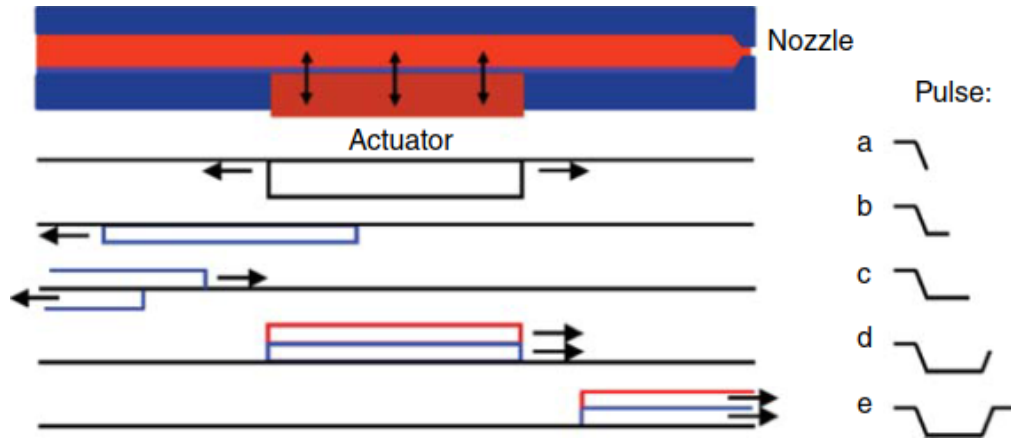
## 2.4 Pietsosähkömustesuihkutulostin

Pietsosähköinen materiaali mahdollistaa energian muunnokset sähköenergiasta mekaaniseksi energiaksi ja toisinpäin [11]. Kun pietsosähköistä materiaalia rasitetaan mekaanisesti, sen sähköinen polaarisuus muuttuu ja vastaavasti kun materiaalia altistetaan sähkökentälle, materiaali muuttaa muotoaan. Tätä pietsosähkömateriaalin sähkömekaanista ominaisuutta onkin hyödynnetty mustesuihkutulostimen tulostuspäässä annostelemaan mustepisaroita [5], [6], [9]. Riippuen siitä miten pietsosähköistä materiaalia on sovellettu, pietsosähkömateriaalia hyödyntävät tulostinpäät voidaan jakaa neljään eri tyyppiin: puristus, vääntö, työntö ja leikkaus -tyyppeihin (ks. Kuva 5). Jännitepulssi saa pietsosähköisen materiaalin laajenemaan, jolloin suuttimen takana olevan mustesäiliön tilavuus pienenee äkillisesti ja tämä vastaavasti synnyttää paineaallon säiliöön, joka työntää mustetta suuttimesta ulos. Suuttimesta ulos tulleen pisaran tilavuus on täysin riippuvainen ohjaavan jännitepulssin amplitudista, pulssin kestosta sekä suuttimen halkaisijasta [9]. Annosteltu mustepisara on kuitenkin tilavuudeltaan samaa luokkaa kuin lämpömustesuihkutulostimessa [6].



**Kuva 5.** DOD-tyyppisen tulostimen pietsosätkötulostinpään eri tyypit. A: Puristus, B: taivutus, C: työntö, D: leikkaus. [6]

Kuvassa 6 on yksinkertaistettu malli pietsosätköistä materiaalia hyödyntävästä mustesuihkutulostimen tulostinpäästä, jonka pitkän kanavan oikealla puolella on mustepisaroiden ulostuloaukko ja vasemmalla kuvan ulkopuolella suuri mustesuihkusäiliö. Lisäksi kuvassa on havainnollistettu mustepisaraa ulostyöntävän paineaallon syntymekanismi ja sen eteneminen kanavassa (ks. Kuva 6, pulssit a-e). Kun pietsosätköistä materiaalia varataan, kanavan poikkipinta-ala kasvaa ja tämä muutos saa aikaan kanavassa negatiivisen paineaallon, joka etenee molempiin suuntiin kanavaa (a). Yksinkertaisuuden vuoksi vain mustepisaraa ulostyöntävä paineaalto on havainnollistettu (b). Negatiivinen paineaalto heijastuu sekä invertoituu mustesuihkusäiliön ja kanavan rajapinnassa ja etenee positiivisena paineaaltona oikealle kohti ulostuloaukkoa (c). Kun pietsosätköisen materiaalin varaus puretaan, kanavan poikkipinta-ala pienenee, jolloin syntyy positiivinen paineaalto, joka summautuu invertoituneeseen paineaaltoon (d). Kuvan kanavan rakenne ja ohjauspulssi on toteutettu siten, että paineaallon amplitudin maksimi on suuttimen ulostuloaukon kohdalla (e). [5]



**Kuva 6.** Havainnollistuskuva pietsosähkötulostinpään toimintaperiaatteesta. [5]

Mustepisaran annostelun jälkeen, kanavaan syntyneet paineaallot eivät häviä välittömästi vaan kulkevat edestakaisin kanavaa ja saavat pietsosähkömateriaalin värähtelemään, jota kutsutaan myös jäännösvärähtelyksi. Jollei näitä paineaaltoja vaimenneta ennen seuraavaa sykliä tulostuslaatu voi heiketä. Edellisen syklin paineaallot summautuvat nykyisen syklin paineaaltoihin, jolloin nykyisen mustepisaran parametrit poikkeavat edellisestä. Toinen havaittu ongelma pietsosähkömustesuihkutulostimissa on ylikuuluminen kahden vierekkäisen tulostinpään kanavan välillä, kun niitä käytetään samaan aikaan, jolloin kunkin kanavan ohjauspulssit saattavat vaikuttaa vierekkäisen kanavan pietsosähkömateriaalin värähtelyyn. [5]

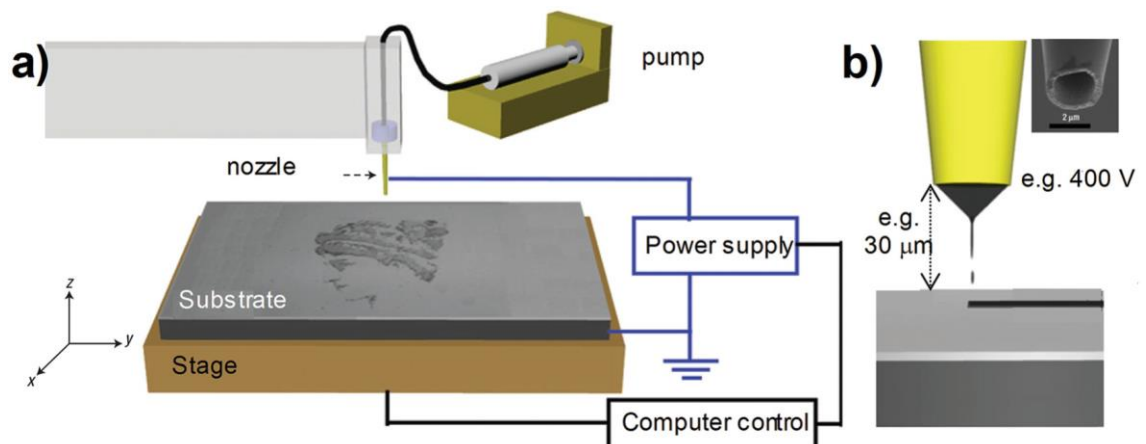
Toisin kuin lämpömustesuihkutulostimissa, pietsosähkömustesuihkutulostin soveltuu monen tyyppisille musteille [6], [9] ja sen lisäksi tulostinpäällä on noin 10–100 kertaa pitempi käyttöikä [5]. Mustepisaroiden muoto ja pudotusnopeus on mahdollista säätää optimoimalla ohjauspulssin muotoa [6], [9]. Edellä mainitut ominaisuudet tekevät pietsosähkömustesuihkutulostimesta kuitenkin kalliin lämpömustesuihkutulostimeen verrattuna tulostinpään materiaalien ja tulostinta ohjaavan ohjelmiston takia [6], [9].

## 2.5 Sähköhydrodynaaminen mustesuihkutulostin

Parhaimmat lämpö- ja pietsosähkötulostimet kykenevät annostelemaan mustepisaroita, joiden tilavuus on pikolitrin luokkaa [12]. Tällöin mustepisaran mitat alustalla ovat minimissään noin 10  $\mu\text{m}$ . Yksi mustepisaran kokoa ja siten myös saavutettavaa maksimiresoluutiota rajoittavista tekijöistä on tulostuspään suuttimen suuaukko [9], [12]. On lähes mahdotonta tuottaa mustepisaroita, joiden halkaisija on pienempi kuin suutti-

men suuaukon halkaisija. Resoluutiota voidaan parantaa pienentämällä suuttimen suuaukon kokoa, mutta tällöin tarvittavan paineen arvo kasvaa epäkäytännöllisen suureksi, kapillaaristen voimien takia. Tämän lisäksi, jo ennestään ongelmallinen suuttimen tukkeutuminen tapahtuisi entistä helpommin mustepartikkelien kokojen ollessa suuria suhteessa suuttimen mittoihin [6], [9]. Resoluutiota voidaan myös parantaa kontrolloimalla alustamateriaalin lämpötilaa tulostamisen aikana [13] tai manipuloimalla alustamateriaalin pintaenergiaa [14], jolloin musteen leviämistä alustalla voidaan minimoida. Tällöinkin johdinvetojen leveydet ovat minimissään noin  $20\ \mu\text{m}$  [15].

Sähköhydrodyaamista (EHD, engl. electrohydrodynamic) -tulostinjärjestelmää hyödyntävissä mustesuihkutulostimissa mustepisarat vedetään sähkökentän avulla suuttimesta, jonka sisähalkaisija voi olla jopa niinkin pieni kuin  $100\ \text{nm}$  [13]. Sen lisäksi, että EHD-tulostimissa käytettävät suuttimet ovat pienempiä kuin tavanomaisissa tulostimissa, EHD-tulostinjärjestelmällä voidaan tuottaa mustepisaroita, joiden halkaisijat ovat huomattavasti pienemmät kuin itse suuttimen suuaukon halkaisija. Parhaimmillaan EHD-tulostinjärjestelmillä voidaan toteuttaa sovelluksia, joiden tulostusresoluutio on alle  $100\ \text{nm}$ . Yksinkertaistettuna EHD-tulostinjärjestelmään kuuluvat seuraavat perusosat: tietokoneohjattu käyttöjännite, johtava ja liikkuva alusta, johtava suutin, sekä pumppujärjestelmä (ks. Kuva 7a).

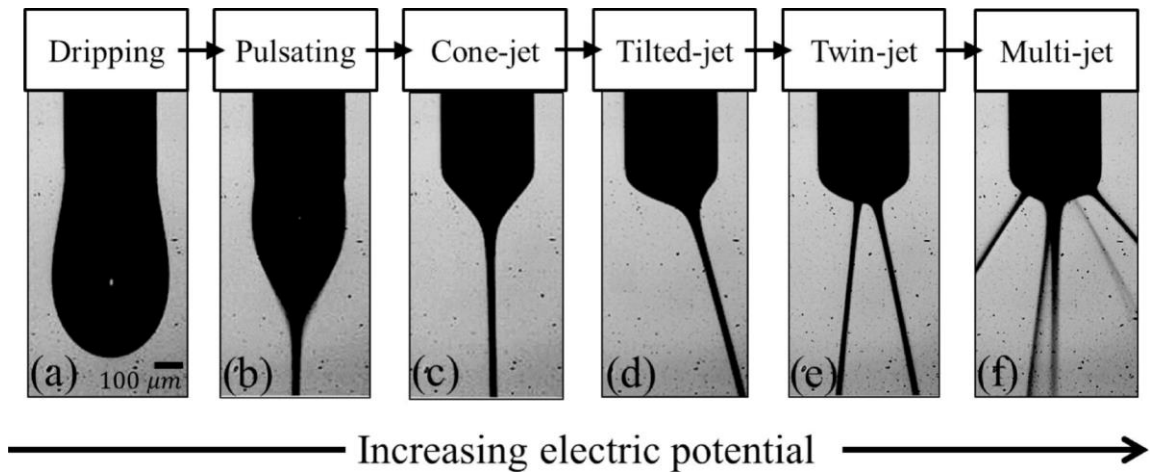


**Kuva 7.** Havainnollistuskuva EHD-tulostinjärjestelmästä (a) sekä suurennettu näkymä suutin - alusta kokoonpanosta (b). [12]

EHD-tulostimissa sähkökenttä saadaan luotua, kun johtavan suuttimen sekä alustan välille kytketään käyttöjännite. Sähkökentän voimakkuutta ja siten myös tulostusominaisuuksia voidaan kontrolloida muuntelemalla käyttöjännitettä. Sähkökentän vaikutuksesta musteessa olevat ionipartikkelit kerääntyvät suuttimen päähän musteen ja ilman rajapinnalle, mutta eivät lennä alustalle musteen pintajännityksen ollessa suurempi kuin sähköstaattinen jännite. Jossain vaiheessa ionipartikkeleita on kerääntynyt niin paljon, että musteen rajapinta on muuttunut kuperasta kartiomaiseksi, jota kutsutaan myös Taylorin kartioksi (ks. Kuva 7b). Kun sähköstaattinen jännite ylittää musteen pintajännitteen, ionipartikkelit lentävät kartion kärjestä suuttimen ja alustan väliin asetetulle alustalle. Pumppujärjestelmä luo niin kutsutun takapaineen, jonka ansiosta suuttimeen virtaa lisää mustetta sitä mukaan kuin sitä poistuu suuttimeesta. Musteen virtausnopeus tulostinjärjestelmässä riippuu takapaineen arvosta, musteen ominaisuuksista sekä suuttimen suuaukon koosta. [12]

Riippuen käytetystä sähkökentän voimakkuudesta ja musteen virtausnopeudesta, EHD-tekniikkaa soveltavia tulostimia voidaan käyttää usealla eri moodilla [16]. Tiputtelumoodissa sähkökentän voimakkuus sekä musteen virtausnopeus ovat alhaisia ja tulostaminen tapahtuu painovoiman avustuksella (ks. Kuva 8a). Käytännössä musteen ei tarvitse olla johtavaa [12], jotta sitä voidaan käyttää EHD-tulostimessa, mutta tällöin mustepisara irtoaa suuttimen kärjestä hitaammalla syklillä [16], kuin mitä tämä voisi sähkökentän avustamana. Pulssi-moodissa musteen muoto suuttimen kärjessä vaihtelee puolipallon ja Taylorin-kartion välillä pintajännityksen ja ionien sähkövarauksesta johtuvan epätasapainon takia (ks. Kuva 8b). Vastaavasti kartiosuihku-moodissa, Taylorin-kartio ei vetäydy lainkaan puolipalloksi vaan pitää muotonsa sähköisen vetovoiman ollessa huomattavasti suurempi kuin pintajännite (ks. Kuva 8c). Sähköisen potentiaalin kasvaessa entisestään, pintajännite ja sähköinen voima ovat jälleen epätasapainossa, jolloin suihku saattaa kääntyä sivuttain tai muodostaa useampia suihkuja (ks. Kuva 8d-f). Erittäin suurille sähkökentän voimakkuuksille mentäessä EHD-tulostin toimii spray-/sumutusmoodilla [12]. Edellä mainituista tulostusmoodeista, pulssi- ja kartiosuihku ovat helposti hallittavia ja takaavat siten korkean tulostusresoluution.





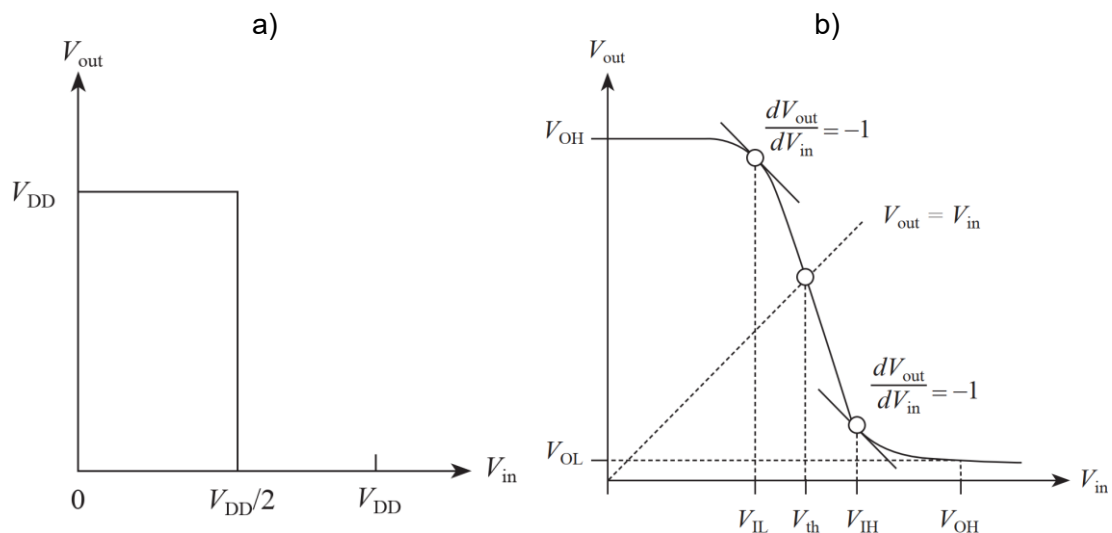
**Kuva 8.** EHD-järjestelmän tulostusmoodit käyttöjännitteen suhteen. [16]

Nanoluokan tulostusresoluution ansiosta EHD-tulostinjärjestelmät soveltuvat perinteisten elektroniikkasovellusten lisäksi esimerkiksi biolääketieteellisiin sovelluksiin, kuten DNA ja proteiiniketjujen valmistamiseen tai optisiin sovelluksiin kuten fotonit ja plasma laitteiden valmistukseen [12]. Vaikka ideana EHD-tulostinjärjestelmä onkin yksinkertainen, tulostusprosessi on kuitenkin hyvin kompleksinen, jossa on otettava huomioon monia tekijöitä [12]. Jopa vallitseva ilmankosteus saattaa vaikuttaa tulostuslaatuun. Hyvästä resoluutiosta huolimatta, tällä hetkellä EHD-tekniikan tulostuslaatu ei kuitenkaan pärjää perinteiselle litografiselle menetelmälle monikerroksisia piirikomponentteja valmistettaessa, sillä piirikomponenttien kulmat ja tasonpinnat tulostuvat rosoisina [15].

## 3. INVERTTERI

### 3.1 Toimintaperiaate

Invertteri, joka tunnetaan myös NOT-porttina, on looginen virtapiiri, jonka lähtö on tulon komplementti [17]. Edellä mainituin perustein, invertterin tulon ollessa alhaalla, eli looginen nolla ('0'), niin lähtö on tällöin ylhäällä, eli looginen ykkönen ('1'). Vastaavasti tulon ollessa ylhäällä tilanne on päinvastainen kuin edellä. Kuvaan 9 on havainnollistettu ideaalisen ja käytännön invertterin sisäänmeno- ja ulostulojännitteen riippuvuus toisistaan. Ideaalisessa invertterissä ulostulo on riippuvainen käyttöjännitteestä ( $V_{DD}$ ) siten, että ulostulojännite ( $V_{out}$ ) pysyy käyttöjännitteen suuruisena, kun sisäänmenojännite ( $V_{in}$ ) vaihtelee 0 ja  $V_{DD}/2$  välillä. Vastaavasti ulostulojännite pysyy nollassa voltissa, kun sisäänmenojännite vaihtelee  $V_{DD}/2$  ja  $V_{DD}$  välillä. Käytännön invertterit poikkeavat kuitenkin ideaalisesta tilanteesta ja siten esimerkiksi loogista nollaa vastaava sisäänmenojännite vaihtelee 0 ja  $V_{IL}$  välillä ja loogista ykköstä vastaava sisäänmenojännite vaihtelee  $V_{IH}$  ja  $V_{DD}$  välillä. Kun taas loogista nollaa vastaava ulostulojännite vaihtelee 0 ja  $V_{OL}$  välillä, ja loogista ykköstä vastaava ulostulojännite vaihtelee  $V_{OH}$  ja  $V_{DD}$  välillä.



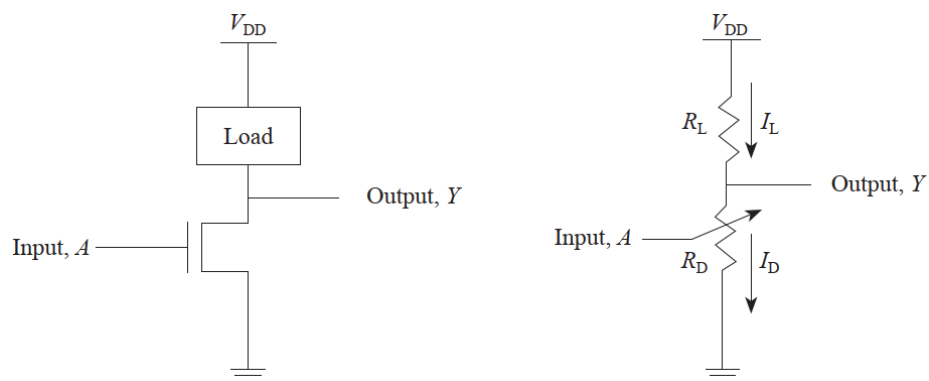
**Kuva 9.** Ideaalisen (a) ja käytännön (b) invertterin jännitteen siirtokäyrät [17]. Invertterin tulo on '0' ja lähtö '1' kun  $V_{in} \leq V_{IL}$ . Invertterin tulo on '1' ja lähtö '0' kun  $V_{in} \geq V_{IH}$ .

Loogisten tilojen kynnysjännitteet tulossa määritellään pisteistä, joissa siirtokäyrän kulmakerroin on  $-1$  (ks. Kuva 9b) [16]. Suuremmat jännitteet kuin  $V_{IH}$  ja pienemmät kuin  $V_{IL}$  eivät vahvistu ja näiden jännitteiden väliin jäävä alue on transiatioalue, jossa invertterin

looginen tila ei ole määritelty. Mitä pienempi transitioalue on, sitä jyrkempi kuvaajan reuna on ja sitä nopeammin myös invertteri vaihtaa tilaansa. Edellä mainituin perustein voidaan todeta, että ideaalinen invertteri vaihtaa loogista tilaansa äärettömällä nopeudella, mikä on havainnollistettu myös Kuvaan 9a, josta käy ilmi, että ulostulojännitteen arvo muuttuu välittömästi arvosta  $V_{DD}$  arvoon  $0\text{ V}$  sisäänmenojännitteen saavuttaessa invertterin kynnyksijännitteen  $V_{DD}/2$ . Kun taas käytännön invertterillä on äärettömästä poikkeava muutosnopeus johtuen komponenttien ominaisuuksista. Liian nopea muutosnopeus ei kuitenkaan ole suotavaa, sillä invertteriin kytkeytyvän häiriösignaalin sietokyky heikkenee. Tällöin invertteri saattaa tahattomasti vaihtaa loogista tilaansa pienenkin ulkoisen häiriösignaalin summautuessa sisäänmenojännitteeseen.

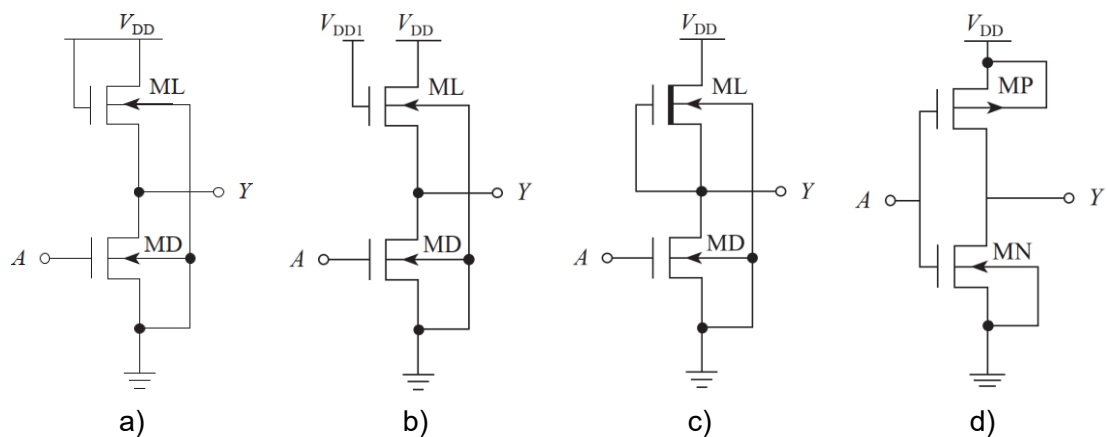
### 3.2 MOS – invertterit

Invertteri voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mutta perusrakenne on kaikissa toteutuksissa samanlainen [17]. Yksinkertaisimmillaan invertteri voidaan toteuttaa yhdellä vastuksella ja NMOS-transistorilla, jossa transistori toimii kytkimenä (ks. Kuva 10). Transistorin hilalle tulevan sisäänmenojännitteen ollessa pieni transistori ei johda, jolloin ulostulon ja maan välillä on potentiaaliero, eli tällöin lähtö on ylhäällä. Vastaavasti sisäänmenojännitteen ollessa suuri transistori johtaa ja siten ulostulon ja maan välillä ei ole potentiaaliero, eli tällöin lähtö on vastaavasti alhaalla. Transistori voidaan ajatella vastuksena  $R_D$ , jonka arvo riippuu sisäänmenojännitteestä ja vastaavasti ulostulojännite  $V_{out}$  riippuu vastusten  $R_D$  ja  $R_L$  suhteesta kaavan  $V_{out} = \frac{R_D}{R_D + R_L} V_{DD}$  mukaisesti, jossa  $R_L$  on kuormavastus. Edellä esitetyn yhtälön perusteella, tulon ollessa alhaalla, lähtö on ylhäällä, kun  $R_D$  on ääretön tai  $R_L$  on nolla. Vastaavasti tulon ollessa ylhäällä, lähtö on alhaalla, kun  $R_D$  on nolla tai  $R_L$  on ääretön.



**Kuva 10.** Resistiivinen kuorma-invertteri (vasen). Transistori toimii vastuksena  $R_D$ , jonka resistiivisyys ja siten ulostulo  $Y$  on riippuvainen sisäänmenosta  $A$ . [17]

Edellä esitetyn resistiivistä kuormaa käyttävän invertterin toteutus vaatii suuren pinta-alan sirusta, johtuen siitä, että transistorin fyysinen koko on suoraan riippuvainen vastuksen arvosta. Edellä mainittu ongelma voidaan kuitenkin välttää esimerkiksi korvaamalla resistiivinen kuorma avaus- tai sulkutyypisellä NMOS-transistorilla, joka toimii invertterin kuormana. Kuvassa 11a kuormana toimivan avaustyyppisen NMOS-transistorin (ML) hila on oikosuljettu nielun kanssa samaan käyttöjännitteeseen, jolloin kyseinen transistori operoi aina saturaatioalueella. Vastaavasti Kuvan 11b toteutuksessa, avaus-tyyppisen NMOS-transistorin hila on kytketty erilliseen käyttöjännitteeseen, jolloin kuormana toimiva transistori voi operoida myös lineaarisella alueella riippuen käyttöjännitteen  $V_{DD1}$  arvosta. Jälkimmäinen toteutustapa ei kuitenkaan ole suotavaa, sillä tämä vaatii erilliset käyttöjännitteet hilalle ja nielulle. Kuvassa 11c on vastaavasti käytetty sulkutyypistä NMOS-transistoria, jonka hila on oikosuljettu lähteeseen, jolloin kyseinen transistori on aina johtavassa tilassa. Kuvissa 11a-c esitetyt invertterin toteutukset toimivat kaikki samalla periaatteella: Tulon ollessa alhaalla ohjaustransistori MD ei johda, jolloin invertterin lähtö on ylhäällä. Ja vastaavasti tulon ollessa ylhäällä ohjaustransistori MD on johtava, jolloin ulostulon voidaan ajatella kytkeytyvän suoraan maahan ja siten invertterin lähtö on ylhäällä.



**Kuva 11.** MOS-invertteri, jonka kuormana on avaustyyppinen NMOS (a-b); MOS-invertteri, jonka kuormana on sulkutyypinen NMOS (c); CMOS-invertteri (d). [17]

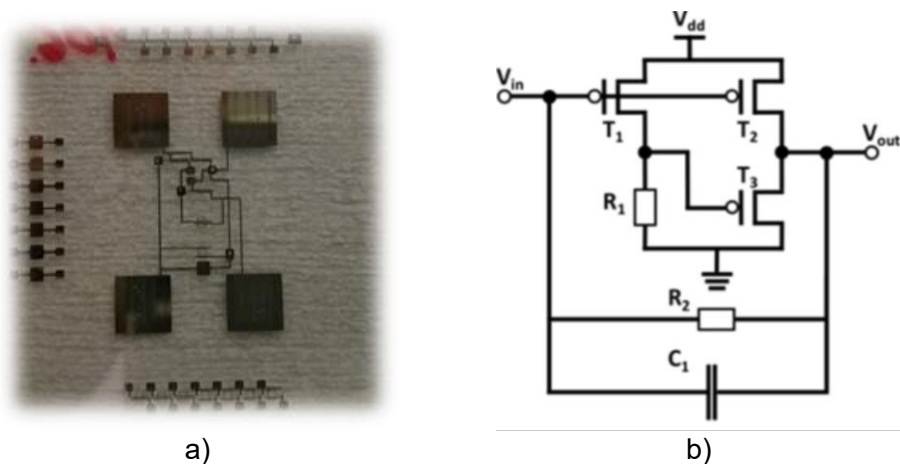
CMOS-invertterissä on hyödynnetty NMOS ja PMOS tyyppin transistoreita (ks. Kuva 11d), jolloin transistorit eivät koskaan ole yhtä aikaa johtavassa tilassa lukuun ottamatta hetkeä, jolloin invertteri vaihtaa tilaansa toiseen [17]. Kyseisessä toteutuksessa NMOS-transistori toimii alavetoverkkona ja vastaavasti PMOS-transistori ylösvetoverkkona. Tulon ollessa alhaalla, PMOS-transistori on johtavassa tilassa ja vastaavasti NMOS-

transistori ei johda. Tällöin ulostulo on oikosuljettu PMOS-transistorin kautta käyttöjännitteeseen ja vastaavasti NMOS-transistori erottaa ulostulon maasta. Vastaavasti tulon ollessa ylhäällä, NMOS-transistori on johtavassa tilassa ja vastaavasti PMOS-transistori ei johda. Tällöin ulostulo on oikosuljettu NMOS-transistorin kautta maahan ja vastaavasti PMOS-transistori erottaa ulostulon käyttöjännitteestä. Lukuun ottamatta hetkeä, jolloin CMOS-invertteri operoi transitoalueella, invertteripiirissä ei synny staattista tehohäviötä, sillä sähkövirralla ei ole suoraa kulkureittiä käyttöjännitteestä maahan. Tämän lisäksi ulostulojännite saa arvonsa koko 0 V:n ja  $V_{DD}$  väliltä, mikä ei ole mahdollista resistiivistä ja NMOS-kuormaa käyttävissä inverttereissä.

## 4. VARAUSVAHVISTIMEN LÄMPÖTILAKÄYTTÄ- TYMISEN MÄÄRITYS

### 4.1 Mitattu orgaaninen varausvahvistin

Tässä työssä tutkitut varausvahvistinnäytteet koostuivat orgaanisesta pseudo-CMOS-invertteristä, johon oli integroitu biasointivastus  $R_1$ , takaisinkytkentävastus  $R_2$  ja takaisinkytkentäkondensaattori  $C_1$  [2] (ks. Kuva 12b). Tämän lisäksi, näytteisiin on tulos-tettu suuret neliön muotoiset elektrodit käyttöjännitettä, maata sekä sisään- ja ulostulo-signaaleita varten (ks. Kuva 12a). Tavallisesti myös orgaaninen CMOS-invertteri koostuu PMOS ja NMOS-transistoreista, mutta n-kanavaisen orgaanisen transistorin valmistaminen on haastavaa voimakkaan elektronisieppauksen takia [18], [19], ja siksi työssä tutkitut varausvahvistimet hyödyntävät pelkästään PMOS-transistoreita. Tämän lisäksi, myös valmistusprosessi yksinkertaistuu, koska ei tarvitse valmistaa kuin yhtä transistorityyppiä. Näytteet oli toteutettu 0.7 mm paksuiseen paryleenilla pintakäsiteltyyn lasilevyyn. Transistorien hilat, nielut, lähteet, kondensaattorin "levyt" sekä komponentteja toisiinsa yhdistävät johdinvedot oli mustesuihkutulostettu hopea-nanopartikkeli-musteella. Vastaavasti transistorien sekä kondensaattorin eristevälit, transistorien kanavat sekä vastukset oli toteutettu dispensointi -laitteistolla. Eristevälin, kanavien ja vastusten materiaalina oli paryleeni, PS:DTBDT-C6 ja P3HT edellä mainitussa järjestyksessä. Tarkeimmat tiedot käytetyistä materiaaleista sekä varausvahvistimen valmistusprosessin vaiheista voi lukea oheisesta viitteestä [2].

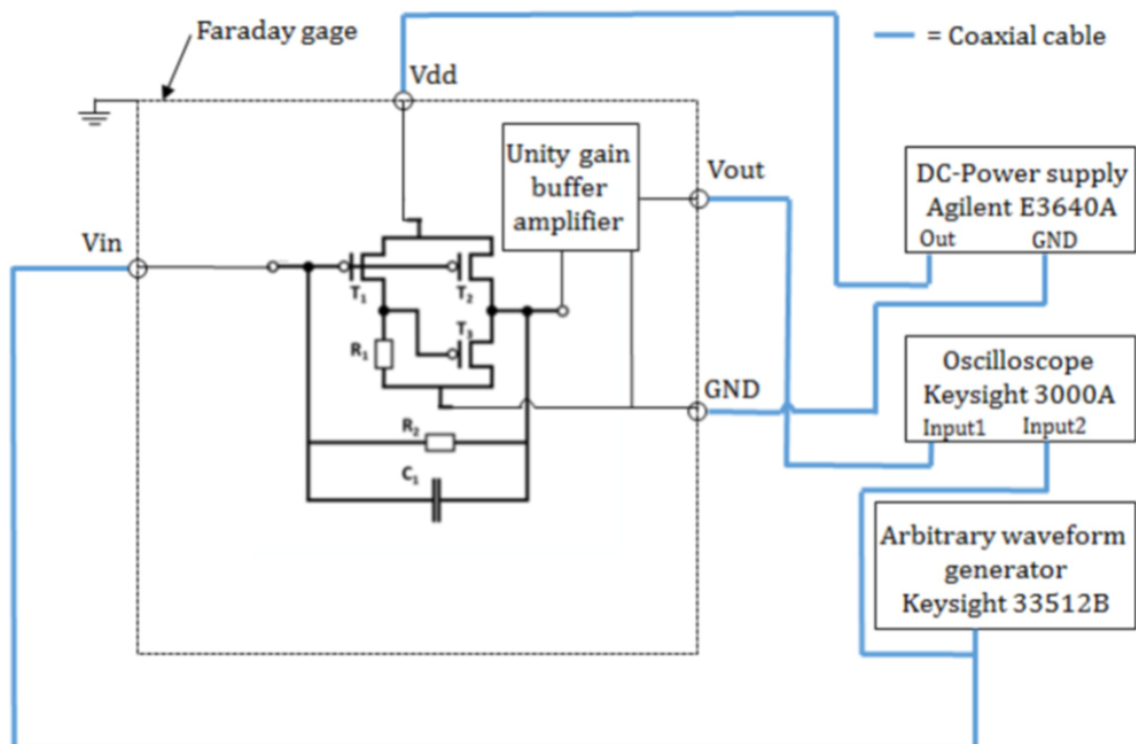


**Kuva 12.** Mitattu varausvahvistinnäyte (a) ja sen piirikaavio (b) [2].

Näytteiden varausvahvistimen tulo on kytketty PMOS-transistoreiden  $T_1$  ja  $T_2$  hilalle, jolloin myös kyseisten transistoreiden kanavat sulkeutuvat ja avautuvat samanaikaisesti. Vastaavasti transistorin  $T_3$  hila on kytketty transistorin  $T_1$  lähteen ja biasointivastuksen  $R_1$  väliin, jolloin transistorin  $T_3$  toiminta on käänteinen verrattuna näihin edellä mainittuihin transistoreihin. Takaisinkytkentävästus  $R_2$  yhdessä takaisinkytkentäkondensaattorin  $C_1$  kanssa määräävät varausvahvistimen aikavakion ja siten myös vahvistuksen arvon.

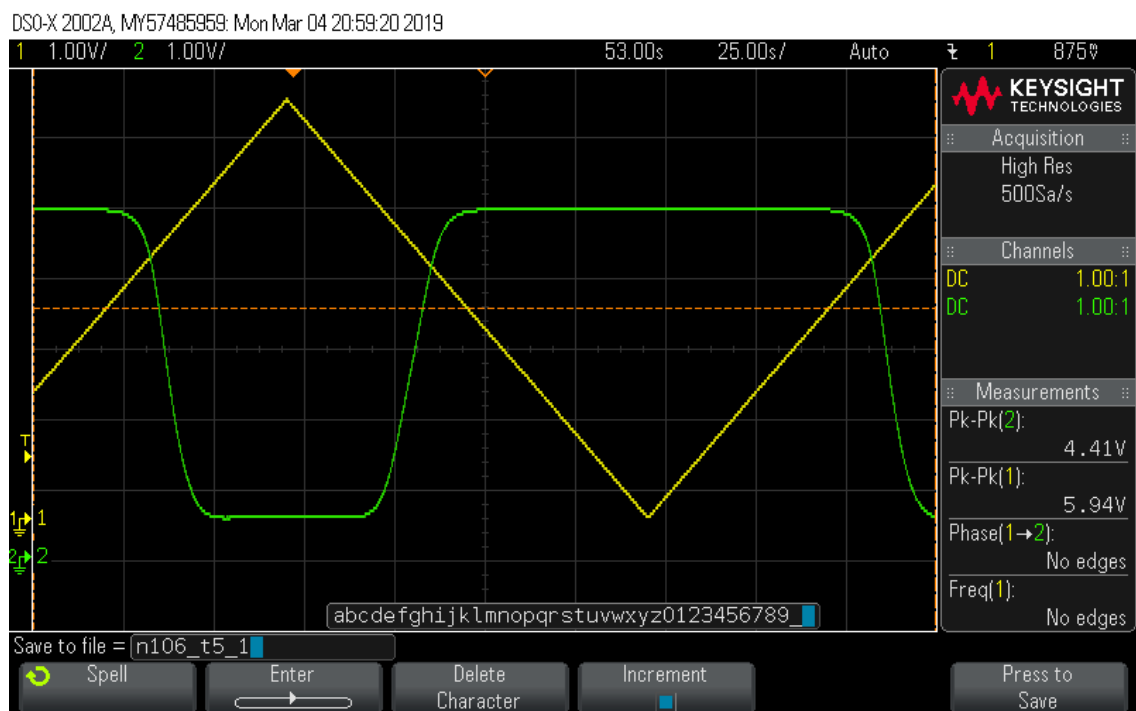
## 4.2 Mittauksen toteutus

Mittaukset suoritettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella sähkötekniikan yksikössä. Mittauksia varten tarvittiin itse näytteiden lisäksi seuraavat välineet: kannellinen metallisäiliö, mallintamaan Faradayn häkkiä; peltier-elementti, lämpötilan säätelyyn; jännitelähteet, peltier-elementin ja varausvahvistimen käyttöjännitteiden syöttämiseen; signaaligeneraattori, sisäänmenosignaalin syöttämiseen; oskilloskooppi, mittausdatan keräämiseen; yleismittari, lämpötilan tarkastamiseen; tietokone, mittausdatan analysointiin. Kuvassa 13 on esitetty havainnollistava kaavio mittausasetelmasta.



**Kuva 13.** Mittausasetelma, jossa mitattava näyte on sijoitettu Faradayn häkin (musta katkoviiva) sisälle. [2]

Parhaan häiriösuodatuksen takaamiseksi mittauksessa käytetty metalliastia oli umpinainen, jonka kyljissä oli läpiviennit käyttäjännitteille, maalle sekä sisään- ja ulostulosignaaleille. Ennen mittausta näyte asetettiin Faradayn häkin sisälle sijoitetun peltier-elementin päälle, jonka jälkeen kaikki syöttö- ja mittausturrit asetettiin näytteen elektrodien päälle. Tämän jälkeen, näyte lämmitettiin haluttuun lämpötila-arvoon säätämällä peltier-elementin käyttäjännitteen arvoa. Kun lämpötila oli asettunut haluttuun arvoon, näytteeneseen kytkettiin 5V suuruinen käyttäjännite ( $V_{dd}$ ), jonka jälkeen näytteen ulostulo mitattiin pyyhkäisemällä sisäänmenosignaali 0 V ja  $V_{dd} + 0,5$  V väliltä (ks. Kuva 14). Kutakin näytettä kohti suoritettiin kaksi mittausta kahdeksassa eri lämpötilassa huonelämpötila mukaan lukien.



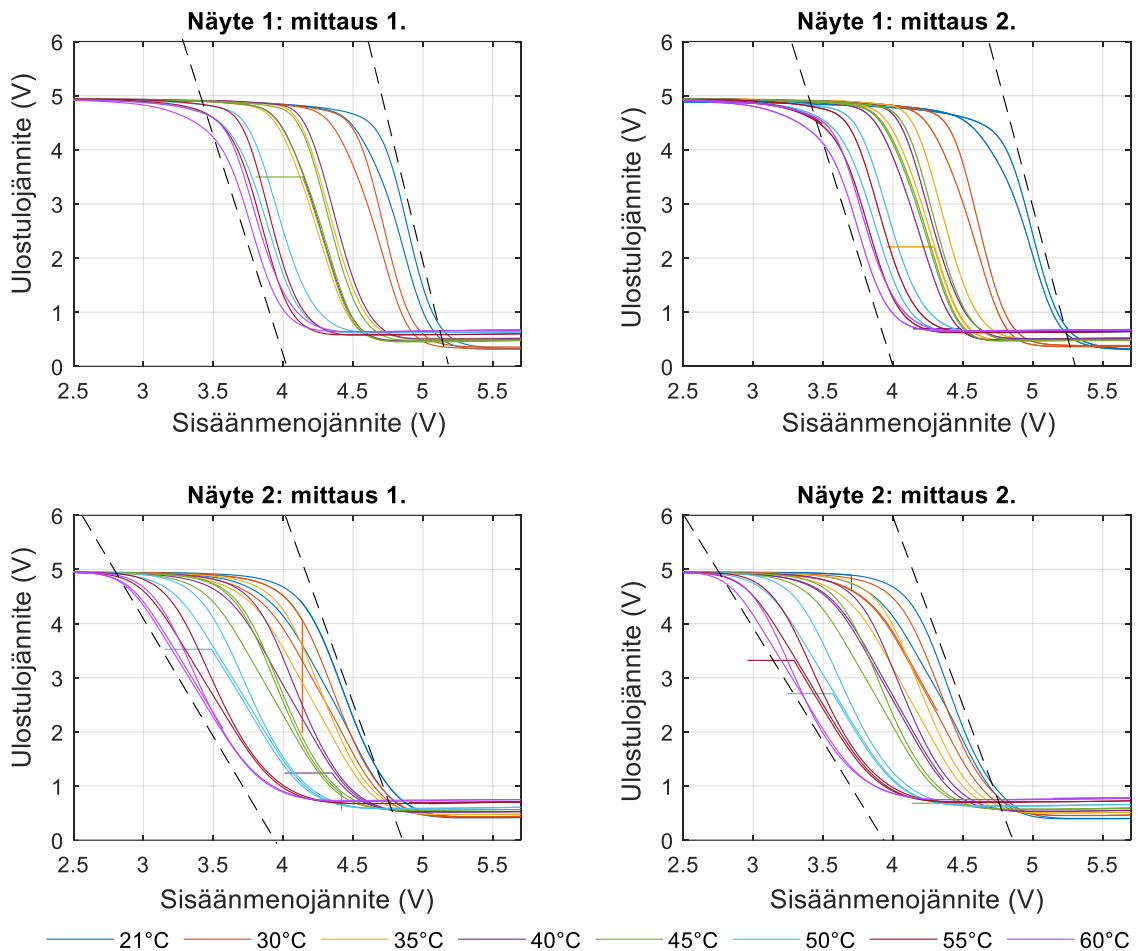
**Kuva 14.** Varausvahvistimen sisäänmenoännite (keltainen kolmioaalto) ja ulostuloännite (vihreä kanttiaalto).

Kustakin mittauksesta saatu data talletettiin csv-tiedostona oskilloskoopista ja analysoitiin hyödyntämällä MATLAB-tietokoneohjelmistoa. Ennen havainnollistavien kuvaajien piirtoa, mittausdatasta poistettiin suurimmat häiriösignaalit hyödyntämällä MATLAB:in kirjastosta löytyviä Savitzky-Golay ja 1-D mediaani filteriä.



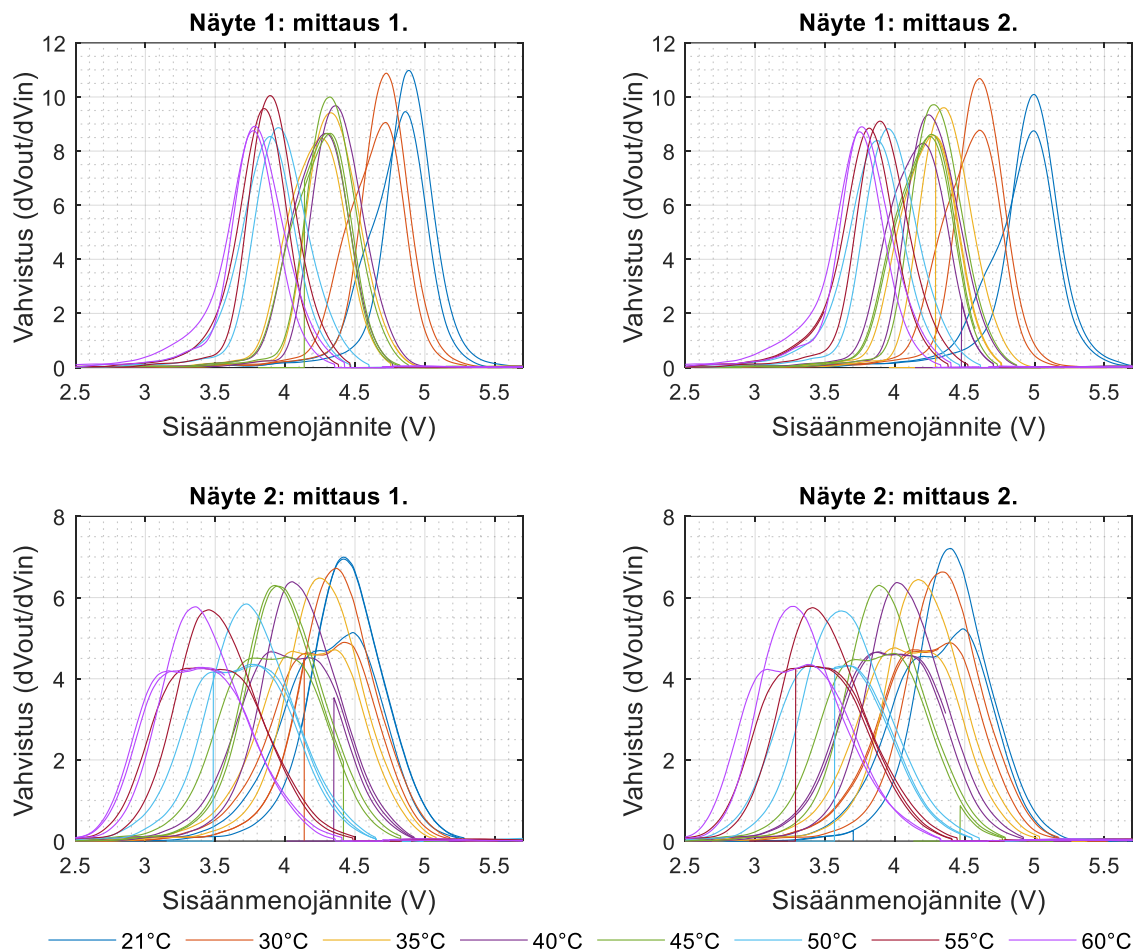
### 4.3 Mittaustulokset

Mittausdatojen pohjalta laadittujen kuvaajien perusteella lämpötilalla näyttäisi olevan selkeä vaikutus näytteiden toiminnallisuuteen. Kuvassa 15 on esitetty kummankin näytteen jännitteen siirtokäyrät, joista on selvästi havaittavissa, kuinka transiioalue (ks. Kuva 9,  $V_{IL} \leq V_{in} \leq V_{IH}$ ) siirtyy sisäänmenojännitteen suhteen lämpötilan muuttuessa. Kun tarkastellaan Kuvan 15 jännitteen siirtokäyriä ja verrataan 21 °C:ssa ja 60 °C:ssa mitattuja käyriä toisiinsa, huomataan, että 60 °C:ssa mitatun käyrän transiioalue on loivempi. Toisin sanoen invertteri vaihtaa tilaansa hitaammin korkeammissa lämpötiloissa. Lisäksi havaitaan, että ulostulojännite saturoituu korkeampaan jännitearvoon lämpötilan noustessa, kun  $V_{in} > V_{IH}$ .



**Kuva 15.** Näytteiden 1 ja 2 jännitteen siirtokäyrät eri lämpötiloissa.

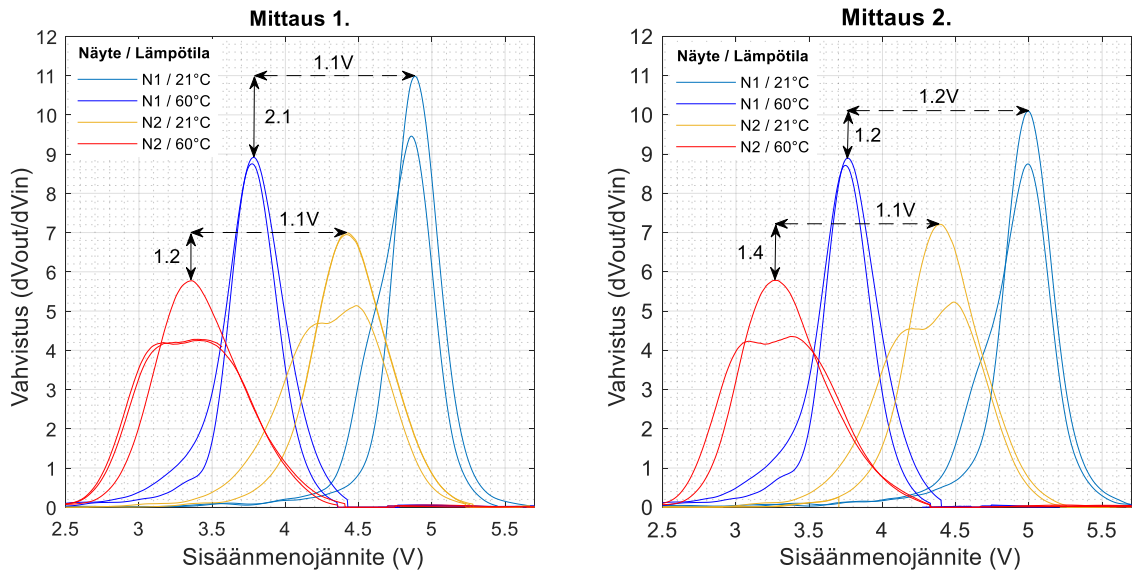
Edellä mainittu lämpötilan vaikutus vahvistukseen on havainnollistettu selkeämmin Kuvassa 16, jossa vahvistuksen kuvaajat on esitetty sisäänmeno-jännitteen funktiona. Erityisesti näytteen 2 ensimmäisestä mittauksesta voidaan huomata, kuinka toimintalämpötilan nostaminen laskee vahvistuksen arvoa lähes lineaarisesti. Kussakin kuvaajassa, samalla värillä esitetyistä käyristä, suuremman vahvistusarvon omaava käyrä on saatu Kuvassa 14 havainnollistetun kanttiaallon laskevalla reunalla ja pienempi arvo nousevalla reunalla.



**Kuva 16.** Näytteiden 1 ja 2 vahvistuksen kuvaajat sisäänmeno-jännitteen funktiona eri lämpötiloissa.

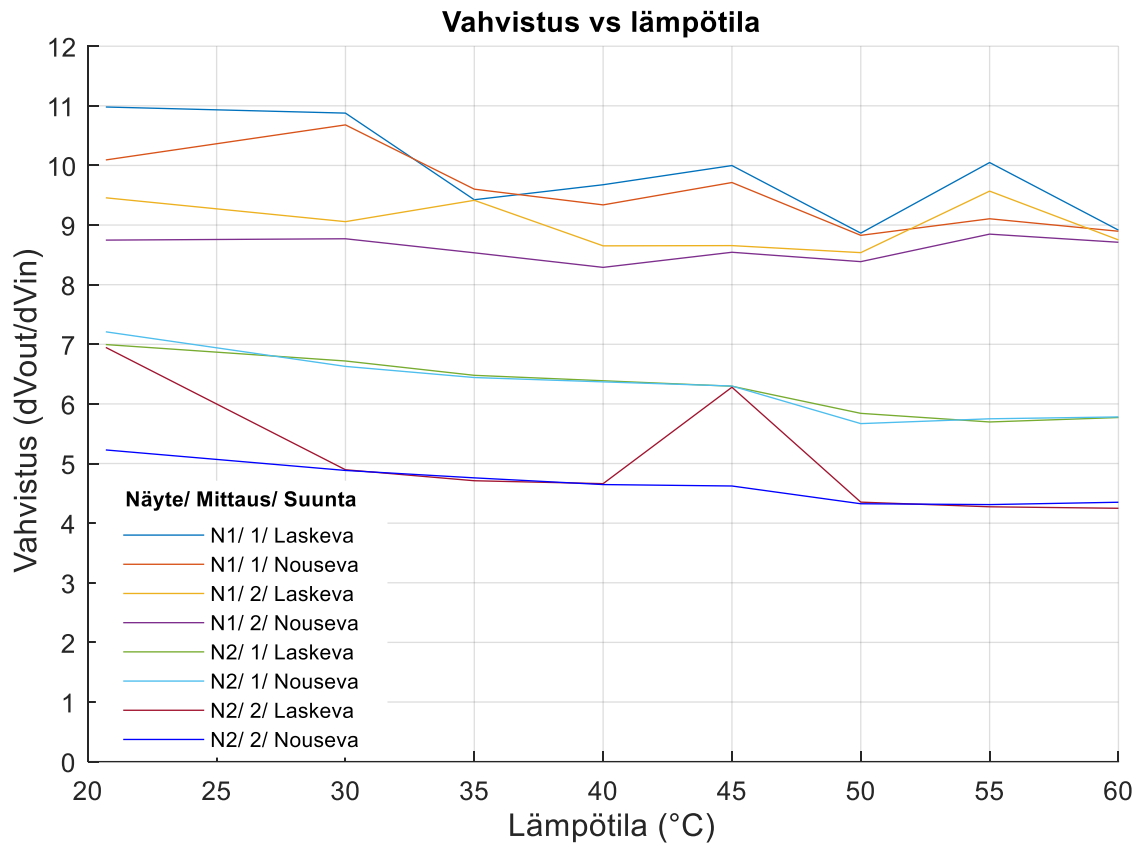
Kuvaan 17 on selkeyden vuoksi havainnollistettu kummastakin näytteestä ja mittauskerrasta vahvistuksen kuvaajat sisäänmeno-jännitteen funktiona, vain matalimmassa ja korkeimmassa lämpötilassa mitattuna. Kuten kuvaajatkin havainnollistavat, kun lämpötila nousee 21 °C:sta 60 °C:een, näytteen 1 (N1) vahvistus laskee 1,2–2,1 ja näytteen 2

(N2) vahvistus 1,2–1,4. Tämän lisäksi kuvaajista käy ilmi, että näyte 1 saa maksimivahvistuksensa 1,1–1.2 V pienemmällä ja näyte 2 vastaavasti 1,1 V pienemmällä sisäänmeno-jännitteen arvolla.



**Kuva 17.** Näytteiden 1 (N1) ja 2 (N2) vahvistuksen kuvaajat sisäänmeno-jännitteen funktiona lämpötiloissa 21 ja 60 °C.

Toisin kuin näytteestä 2, näytteen 1 vahvistuksen riippuvuutta lämpötilasta ei voida luotettavasti tehdä tulkintoja edellisten kuvaajien perusteella. Vaikka näyte 1 vaikuttaisi-kin käyttäytyvän satunnaisesti edellisten kuvaajien perusteella, on Kuvassa 18 havaittavis-ssa selkeää lineaarista käyttäytymistä, kun vahvistus esitetään lämpötilan funktiona. Joitakin yksittäisiä mittauksia lukuun ottamatta, kummankin näytteen vahvistukset laskevat lineaarisesti toimintalämpötilan kasvaessa.



**Kuva 18.** Näytteiden 1 (N1) ja 2 (N2) vahvistuksen kuvaajat lämpötilan funktiona.

Mittausten toteutusvaiheessa ei ollut tiedossa, miten sisäänmeno- ja ulostulosignaalien kohdistaminen oskilloskoopin näytölle tulee vaikuttamaan kerättävään dataan, minkä takia osassa kuvaajista on kolme saman väristä käyrää (ks. Kuvat 16–17). Näissä tapauksissa analysoitava data on otettu talteen oskilloskoopista siten, että näytössä näkyy sisäänmenosignaalin tai ulostulosignaalin kaksi laskevaa reunaa ja yksi nouseva reuna tai päin vastoin. Tästä ylimääräisestä käyrästä huolimatta, kuvaajista käy selvästi ilmi lämpötilan vaikutus näytteiden toiminnallisuuteen.

#### 4.4 Mittaustulosten analysointi

Luonnollisesti, koska varausvahvistin koostuu useista eri komponenteista, on myös sen suorituskyky riippuvainen kunkin komponentin suorituskyvystä. Komponenttimateriaalien sähköominaisuudet ovat riippuvaisia niin sisäisistä- kuin ulkoisista tekijöistä [19], [20]. Sisäisiin tekijöihin lukeutuu materiaalin kemiallinen ja fysikaalinen rakenne, kun taas ulkoisia tekijöitä ovat esimerkiksi lämpötila ja kosteus. Useimmat orgaaniset materiaalit reagoivat herkästi ympäristön olosuhteisiin, mikä vastaavasti rajoittaa orgaanisten

komponenttien suorituskykyä ja stabiilisuutta [19]. Esimerkiksi ilman kanssa reagoinnilla on douppausvaikutus materiaaliin, eli tällöin varaustenkuljettajien tiheys materiaalissa muuttuu. Varaustenkuljetus orgaanisissa komponenteissa on vahvasti riippuvainen komponenttien mikro- ja makrorakenteesta, kuten molekyyli- ja polymeeriketjujen pakkausjärjestyksestä sekä liitosten laadusta komponentin eri kerrosten tai toisen komponentin välillä [3], [19], [20]. Epäpuhtaudet ja rakenteen epäsäännöllisyys heikentää johtavuutta, sillä varaustenkuljettajia sitovien ”energialoukkujen” määrää lisääntyy [19]. Materiaalirajapintojen laatu on merkittävä tekijä erityisesti orgaanisten transistorien suorituskyvyssä, sillä varaustenkuljetus tapahtuu pääosin hilan eristemateriaalin ja kanavan puoli-johdemateriaalin rajapinnassa [19], [21], [22].

Johtavissa orgaanisissa materiaaleissa varausten kuljetus pitkin konjugoitunutta polymeeriketjua on suhteellisen vaivatonta päällekkäin limittyneiden  $\pi$ -orbitaalien ansiosta [19], [20]. Kun taas varausten kuljetus eri polymeeriketjujen välillä on vastaavasti haastavampaa johtuen amorfisesta rakenteesta sekä heikosta vuorovaikutuksesta molekyyliketjujen välillä. Epäsäännöllisen rakenteen takia orgaanisissa materiaaleissa varauksenkuljettajat ovat lokalisoituneet ”energialoukkuihin” ja siksi varauksen kuljetus tapahtuukin pääosin lämpövirittymisellä, fononi-avusteisena ”hyppynä” sekä polaron-avusteisena tunnelloitumisena lokalisoitujen tilojen välillä [19], [20]. Lämpötila vaikuttaa myös eristemateriaalissa olevien polarisoituvien yksiköiden orientoitumiskykyyn vallitsevan AC-signaalin mukaisesti [23]. Toimintalämpötilan ollessa lasittumislämpötila-alueen alapuolella, vain harva dipolimolekyyli kykenee orientoitumaan sähkökentän mukaisesti vähäisen lämpöliikkeen ja amorfisen rakenteen takia. Lämpötilan nousu lisää dipolimolekyylien lämpöliikettä ja siten yhä useampi dipolimolekyyli kykenee kääntymään sähkökentän suuntaisesti. Lämpötilan noustessa lasittumislämpötilan alueelle, materiaalin eristevakio ( $\epsilon$ ) ja häviökerroin ( $D_F$ ) kasvavat äkillisesti, koska dipolimolekyylit pääsevät kääntymisen lisäksi myös liikkumaan polymeeriketjussa. Lämpötilan noustessa edelleen, liiallinen lämpövärinä heikentää orientoituneisuutta. Lisäksi lämpölaajenemisen takia materiaalin nettovaraus laskee, mikä vastaavasti laskee eristevakion arvoa jonkin verran.

Kuvassa 15 havainnollistettu transitoalueen siirtymä sisäänmenojännitteen suhteen lämpötilan muuttuessa, johtuu pääosin transistorimateriaalien ominaisuuksista. Lisäännytynyt lämpövärähtely parantaa transistorien kanavassa lokalisoituneiden varauksenkuljettajien liikkuvuutta. Näin ollen hilalle tuleva sisäänmenojännite  $V_{in}$  vaikuttaa herkemmin varauksenkuljettajiin, jolloin transistorin kanavan sulkemiseen tai avaamiseen tarvittava kynnysjännite on pienempi korkeammassa lämpötiloissa. Vastaavasti ulostulojännitteen

saturoituminen eri jännitearvoihin, kun  $V_{in} > V_{IH}$ , johtuu mitä ilmeisemmin transistorien epäideaalisuuksista johtuvista vuotovirroista hilan eristemateriaalissa ja kanavamateriaalissa [20]. Transistorin  $T_1$  kanavan läpi tuleva vuotovirta on sitä suurempi, mitä suurempi lämpötila on. Edellä mainitun syyn perusteella, korkeammissa lämpötiloissa ulostulojännitteen arvot saturoituvat suurempiin jännitearvoihin, sillä transistorin  $T_3$  kanavan leveys pienenee, kun biasointivastuksen  $R_1$  yli oleva jännite kasvaa.

Vahvistuksen poikkeamat vastaavasti johtuvat pääosin takaisinkytkentäkomponenttien ominaisuuksien muutoksesta. Lämpötilan noustessa kondensaattorin eristemateriaalin eristevakion arvo nousee, jolloin kondensaattori kykenee varastoimaan enemmän energiaa. Näin ollen kondensaattorin lataaminen tai purkaminen vie pidemmän ajan, jonka vuoksi transitioalue on loivempi korkeammissa lämpötiloissa. Lisäksi vastusmateriaalina käytetyn P3HT:n johtavuus paranee lämpötilan noustessa [24], mikä edelleen hidastaa kondensaattorin lataus- tai purkausnopeutta. Lämpölaajenemisen vaikutus varausvahvistimen sähköominaisuuksiin voidaan olettaa olevan mitätön, sillä mittaukset suoritettiin hyvin kapealla lämpötilaskaalalla. Lämpölaajenemisella on kuitenkin negatiivinen vaikutus komponenttien käyttöikään, joten sitä ei voida jättää huomiotta materiaaleja valittaessa. Lämpölaajenemiskertoimien erot aiheuttavat materiaalien rajapintaan mekaanisen rasituksen, joka ajan mittaan rikkoo rajapinnan rakenteen pysyvästi [25]. Tällöin varaustenkuljetus estyy osittain tai kokonaan riippuen, kuinka pahasti rajapinta on vioittunut.

Lämpötilariippumattomuutta voidaan parantaa hienosäätämällä materiaalien molekyyliarakennetta, kuten molekyylipainoa ja sivuketjujen pituutta, materiaalien syntetisoinnin aikana [19], [20]. Myös valmistusprosessien, kuten lämpökäsittelyajan, filmin paksuuden, liuottimen valinnan, pinnoitusmenetelmän ja parametrien optimoiminen edesauttaa lämpötilariippumattomuutta. Materiaalirajapintojen laadun parantamisessa voidaan käyttää esimerkiksi itseasettuvaa ainetta, joka luo materiaalien väliin kontaktiresistanssia vähentävän kerroksen. Esimerkiksi tässä työssä, lähteiden/nielujen ja puolijohdemateriaalin rajapinnan välistä kontaktiresistanssia on minimoitu isopropanoli ja pentafluoribentseenitioli-seoksella [2]. Valmistusvaiheessa materiaaleihin tarttuvat epäpuhtaudet, esimerkiksi ilman kanssa reagoidessa, voidaan estää toteuttamalla valmistusprosessi inertissä ympäristössä, kuten tyhjiössä. Lämpötilariippumattomuuden parantamisessa olennaista on käytettyjen materiaalien epäpuhtauksien minimoiminen ja kiderakenteen säännöllisyyden maksimoiminen, jolloin myös energialoukkujen määrä minimoituu. Korkeat materiaalin laadut ja monimutkaiset valmistusprosessinvaiheet kuitenkin vaikuttavat epäsuotuisasti kokonaiskustannuksiin.

## 5. YHTEENVETO

Mittausten perusteella ei jää epäselväksi, etteikö lämpötilalla olisi vaikutusta varausvahvistinnäytteiden toiminnallisuuteen. Näytteiden jännitteensiirtokäyrissä transiatioalue siirtyy sisäänmenojännitteen suhteen lämpötilan muuttuessa, mikä pääosin viittaa transistorien sähköominaisuuksien muutokseen. Myös transiatioalueen jyrkkyys muuttuu, mikä vastaavasti viittaa takaisinkytkentäkomponenttien sähköominaisuuksien muutokseen. Lämpötilariippuvuus on vahvasti sidoksissa komponenttien mikro- ja makrorakenteeseen. Orgaanisen materiaalin polymeeriketjujen kemiallinen rakenne, ketjujen pakkausjärjestys ja orientoituminen esimerkiksi transistorin kanavan suhteen vaikuttaa vahvasti varaustenkuljettajien liikkuvuuteen. Liitosten laadulla komponentin eri kerrosten tai toisen komponentin välillä on erittäin suuri vaikutus erityisesti transistorien toimintaan.

Lämpötilariippuvuus on sitä merkittävämpi, mitä enemmän materiaalissa on epäpuhtauksia sekä epäsäännöllisyyksiä tai rakennevirheitä mikro- ja makrorakenteessa, sillä ne lisäävät varaustenkuljettajia sitovien "energialoukkujen" määrää. Lämpötilariippumattomuutta voidaan parantaa hienosäätämällä materiaalien molekyyli­rakennetta syntetisoinnin aikana, optimoimalla valmistusprosessien parametrit ja materiaalivalinnat sekä toteuttamalla valmistusprosessi inertissä ympäristössä. Tällöin kuitenkin materiaali- ja valmistuskustannukset saattavat nousta epäsuotuisaksi.

## LÄHTEET

- [1] E. D. Williams, R. U. Ayres, and M. Heller, 'The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices', *Environ Sci Technol*, vol. 36, no. 24, pp. 5504–5510, Dec. 2002, doi: 10.1021/es025643o.
- [2] M.-M. Laurila *et al.*, 'A Fully Printed Ultra-Thin Charge Amplifier for On-Skin Biosignal Measurements', 2019.
- [3] K. Suganuma, *Introduction to Printed Electronics*, vol. 74. New York, NY: Springer New York, 2014. doi: 10.1007/978-1-4614-9625-0.
- [4] K. K. B. Hon, L. Li, and I. M. Hutchings, 'Direct writing technology—Advances and developments', *CIRP Annals*, vol. 57, no. 2, pp. 601–620, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.006.
- [5] S. D. Hoath, *Fundamentals of inkjet printing: the science of inkjet and droplets*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2016.
- [6] J. Li, F. Rossignol, and J. Macdonald, 'Inkjet printing for biosensor fabrication: combining chemistry and technology for advanced manufacturing.', *Lab Chip*, vol. 15, no. 12, pp. 2538–58, Jun. 2015, doi: 10.1039/c5lc00235d.
- [7] Yan Zhang, Changqing Liu, and D. Whalley, 'Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-the-art technologies', in *2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2009, pp. 497–503. doi: 10.1109/ICEPT.2009.5270702.
- [8] S. Kholghi Eshkalak, A. Chinnappan, W. A. D. M. Jayathilaka, M. Khatibzadeh, E. Kowsari, and S. Ramakrishna, 'A review on inkjet printing of CNT composites for smart applications', *Appl Mater Today*, vol. 9, pp. 372–386, 2017, doi: 10.1016/j.apmt.2017.09.003.
- [9] A. Soleimani-Gorgani, 'Inkjet Printing', in *Printing on Polymers*, Elsevier, 2016, pp. 231–246. doi: 10.1016/B978-0-323-37468-2.00014-2.
- [10] S. Khan, L. Lorenzelli, and R. S. Dahiya, 'Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review', *IEEE Sens J*, vol. 15, no. 6, pp. 3164–3185, 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2375203.



- [11] O. Guillon, *Advanced ceramics for energy conversion and storage*. 2019. doi: 10.1016/C2017-0-04078-8.
- [12] M. S. Onses, E. Sutanto, P. M. Ferreira, A. G. Alleyne, and J. A. Rogers, 'Mechanisms, Capabilities, and Applications of High-Resolution Electrohydrodynamic Jet Printing', *Small*, vol. 11, no. 34, pp. 4237–4266, Sep. 2015, doi: 10.1002/sml.201500593.
- [13] D. Soltman and V. Subramanian, 'Inkjet-Printed Line Morphologies and Temperature Control of the Coffee Ring Effect', *Langmuir*, vol. 24, no. 5, pp. 2224–2231, 2008, doi: 10.1021/la7026847.
- [14] J. Z. Wang, Z. H. Zheng, H. W. Li, W. T. S. Huck, and H. Sirringhaus, 'Dewetting of conducting polymer inkjet droplets on patterned surfaces', *Nat Mater*, vol. 3, no. 3, pp. 171–176, Mar. 2004, doi: 10.1038/nmat1073.
- [15] M.-M. Laurila, B. Khorramdel, and M. Mäntysalo, 'Combination of E-jet and inkjet printing for additive fabrication of multilayer high-density RDL of silicon interposer', 2017.
- [16] A. Lee, H. Jin, H.-W. Dang, K.-H. Choi, and K. H. Ahn, 'Optimization of Experimental Parameters To Determine the Jetting Regimes in Electrohydrodynamic Printing', *Langmuir*, vol. 29, no. 44, pp. 13630–13639, Nov. 2013, doi: 10.1021/la403111m.
- [17] das Debaprasad, 'MOS Inverters', in *VLSI Design*, 2nd Edition., Oxford University Press, 2015, pp. 83–105.
- [18] A. Dodabalapur, 'Negatively successful', *Nature*, vol. 434, no. 7030, pp. 151–152, Mar. 2005, doi: 10.1038/434151a.
- [19] F. M. Li, *Organic thin film transistor integration a hybrid approach*. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
- [20] P. Stallinga, *Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices*, 1. Aufl. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009. doi: 10.1002/9780470750162.
- [21] J. Veres, S. D. Ogier, S. W. Leeming, D. C. Cupertino, and S. Mohialdin Khaffaf, 'Low-k Insulators as the Choice of Dielectrics in Organic Field-Effect Transistors', *Adv Funct Mater*, vol. 13, no. 3, pp. 199–204, Mar. 2003, doi: 10.1002/adfm.200390030.

- [22] V. Coropceanu and J.-L. Brédas, 'A polarized response', *Nat Mater*, vol. 5, no. 12, pp. 929–930, 2006, doi: 10.1038/nmat1791.
- [23] Dang Zhi-Min, 'Dielectric Polymer Materials with High Thermal Stability', in *Dielectric Polymer Materials for High-Density Energy Storage*, Elsevier, 2018, pp. 383–415.
- [24] C. Liu, K. Oshima, M. Shimomura, and S. Miyauchi, 'Anisotropic conductivity–temperature characteristic of solution-cast poly(3-hexylthiophene) films', *Synth Met*, vol. 156, no. 21–24, pp. 1362–1367, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.synthmet.2006.10.007.
- [25] J. Wieme and V. van Speybroeck, 'Unravelling thermal stress due to thermal expansion mismatch in metal-organic frameworks for methane storage', *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability*, vol. 9, no. 8, pp. 4898–496, 2021, doi: 10.1039/d0ta09462e.