

Santeri Lehtinen

# ERISTEKALVON VALMISTUS ULTRANOPEAAN FOTODIODIIN

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Dosentti Jukka Viheriälä  
Huhtikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Santeri Lehtinen: Eristekalvon valmistus ultranopeaan fotodiodiin

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma

Huhtikuu 2024

Ultranopeilla fotodiodeilla on käyttöä lukuisissa sähkömagneettisen spektrin terahertsialueen (100 GHz – 10 THz) sovelluksissa, kuten tiedonsiirrossa ja spektroskopiassa ja kuvantamisessa. Näissä sovelluksissa fotodiodilta vaaditaan hyvin suurta toimintanopeutta, jota voi rajoittaa esimerkiksi laitteen rakenteesta johtuva kapasitanssi. Sen minimoimiseksi työn kohteena olevassa laitteessa käytetään bentsosyklobuteenipohjaisesta polymeerista (BCB) valmistettua eristekalvoa eristämään laitteen elektrodit toisistaan sähköisesti. Eristekalvo on kuitenkin joustava, mikä voi haitata kalvon päällä olevan liitoskohdan lankaliittämistä.

Tässä kandidaatintyössä tutustuttiin sähköeristeiden teoriaan ja erityisesti niiden dielektrisiin ominaisuuksiin. Teorian avulla motivoitiin BCB:n käyttöä fotodiodin eristemateriaalina. Työn kohteellisen osuuden tavoitteena oli kehittää valmistusprosessi eristekalvon päälle valmistettavalle kontaktille, joka kestää lankaliittämisen. Valmistusprosessin kehitystyö sisälsi fotodiodin anodikontaktia vastaavien rakenteiden valmistamista puhdistilassa ja valmistettujen näytteiden kestävyys- ja testiä lankaliittämällä. Murtuneita liitoskohtia kuvattiin optisella mikroskoopilla ja erilaisia rakenteita vertailtiin tarkastelemalla, kuinka suuri osuus liitosyrityksistä onnistui.

Kehitystyössä havaitut keskeisimmät ongelmat olivat liitoskohdan metallirakenteen heikkous ja BCB:n ja sen päälle kasvatetun piidioksidihutkalvon välinen heikko tarttuvuus. Metallirakennetta yritettiin vahvistaa paksulla titaanikerroksella, mikä ei osoittautunut toimivaksi ratkaisuksi kerroksen höyrystämässä ilmenneiden ongelmien vuoksi. Lisäksi heikkoa tarttuvuutta yritettiin parantaa BCB:lle tehtävällä *in situ* -tyyppi-plasmakäsittelyllä, mutta käsittelystä huolimatta tämä ongelma ei täysin ratkennut.

Työn tuloksena syntyi valmistusprosessi, jossa hyödynnettiin kemiallista nikkelöintiä noin 2 µm paksun metallivahvikekerroksen tekemiseen. Vahvikekerroksen sisältävät liitoskohdat osoittautuivat lankaliitostesteissä hyvin kestäviksi, ja niiden liitettävyyden oli erittäin hyvä. Valmistusprosessin kehityksen ohella työssä optimoitiin lankaliitoslaitteen parametreja. Optimoiduilla parametreilla näytteille tehdyt lankaliitosmenetelmän toiset liitokset pysyivät paremmin kuin ensimmäiset liitokset.

Avainsanat: lankaliittäminen, eristekalvo, BCB, fotodiodi, kemiallinen nikkelöinti, matalan permittiivisyyden materiaali

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

## ABSTRACT

Santeri Lehtinen: Fabrication of an Insulating Film for an Ultrafast Photodiode  
Bachelor's thesis  
Tampere University  
Bachelor's Programme in Engineering and Natural Sciences  
April 2024

---

Ultrafast photodiodes are useful in various applications of the terahertz region of the electromagnetic spectrum (100 GHz – 10 THz), including data transmission, spectroscopy, and imaging. These applications require photodiodes operating at an extremely high speed. The operating speed of a photodiode may be limited by a capacitance caused by the structure of the device. In this case, the capacitance is minimized by insulating the electrodes of the device with a polymer film based on benzocyclobutene (BCB). However, the elasticity of the film impedes the wire bonding on the contact pad on top of the film if the pad is not strong enough.

In this thesis, the theory related to electrical insulators, especially to their dielectric characteristics, was explored. The theory motivates the use of BCB as an insulating material. The goal of the experimental section was to develop a fabrication process for a contact pad which withstands wire bonding despite being on top of an elastic film. The development work included the fabrication of structures similar to the anode contact of the photodiode. The samples were fabricated in a cleanroom. The different pad structures were tested by wire bonding and compared by their successful bond yields. The fractured pads were imaged using an optical microscope to find targets of improvement.

The main problems discovered were the structural weakness of the metal pad and the poor adhesion between the BCB and silicon dioxide film on top of it. Attempts were made to reinforce the metal pad with a thick layer of titanium, but the attempts were suppressed by the problems occurred during the evaporation of titanium. Additionally, an *in situ* nitrogen plasma treatment on BCB was conducted to improve the adhesion to silicon dioxide. Despite this, the problem somewhat remained.

As an outcome of the work, a fabrication process utilizing electroless plating to deposit a 2- $\mu\text{m}$  thick nickel reinforcement layer was developed. The reinforced pads were strong enough to withstand the wire bonding excellently. Moreover, the wire bonding parameters were adjusted to improve the bond yield. The first bond on the pad was observed to yield better sticking than the second on the pad.

Keywords: wire bonding, insulating film, BCB, photodiode, electroless nickel plating, low- $\kappa$  dielectric

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston Optoelektroniikan tutkimuskeskudessa. Haluan kiittää erityisesti työni ohjaajaa, tekniikan tohtori Jukka Viheriälää arvokkaista neuvoista ja mahdollisuudesta päästä työskentelemään mielenkiintoisissa tehtävissä teknologian parissa. Haluan osoittaa erityiskiitokseni myös diplomi-insinööri Mervi Koskiselle, joka perehdytti minut puhdastilan saloihin. Lisäksi kiitän kaikkia ORC:llä työskenteleviä avuliaan työilmapiirin luomisesta. Kiitän vielä kandidaatintyöseminaarikurssin vastuuhenkilöitä Heino Kuuluvaista ja Ilkka Kylänpäätä heidän tarjoamistaan neuvoista.

Lopuksi haluan osoittaa kiitokset perheelleni ja ystäväilleni, jotka ovat olleet tukenani tähänastisissa opinnoissani. Heidän kannustuksensa merkitsee minulle paljon.

Tampereella, 29. huhtikuuta 2024

Santeri Lehtinen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto . . . . .	1
2.	Sähköeristeet . . . . .	2
2.1	Eristeen määritelmä . . . . .	2
2.2	Aineen polarisaatio . . . . .	3
2.3	Eristeet vaihtosähkökentässä . . . . .	6
3.	Eristekalvo fotodiodissa . . . . .	11
3.1	Fotodiodi . . . . .	11
3.2	Fotodiodin taajuusvaste . . . . .	12
3.3	Eristekalvon materiaali . . . . .	14
4.	Näytteiden valmistus ja siihen käytetyt menetelmät . . . . .	16
4.1	Näytteen rakenne . . . . .	16
4.2	Valmistaminen puhdastilassa . . . . .	16
4.3	Lankaliittäminen . . . . .	21
5.	Lankaliitostestit ja tulokset . . . . .	24
5.1	Haasteet anodikontaktin lankaliittämisessä . . . . .	24
5.2	Kehitystyö . . . . .	24
5.3	Liitostestien tulokset . . . . .	29
6.	Yhteenveto . . . . .	33
	Lähteet . . . . .	35

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\alpha$	polarisoituvuus
Au	kulta
BCB	bentsosyklobuteeni (engl. <i>benzocyclobutene</i> )
$C$	kapasitanssi
<b>E</b>	sähkökenttä
$\epsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys
EN	autokatalyyttisesti pinnoitettu nikkeli (engl. <i>electroless nickel</i> )
$\epsilon_r$	suhteellinen permittiivisyys
$\epsilon'_r$	suhteellisen permittiivisyyden reaaliosa
$\epsilon''_r$	suhteellisen permittiivisyyden imaginaariosan suuruus
$f_{3\text{dB}}$	puolen tehon rajataajuus
HMDS	heksametyylidisilatsaani
Ni	nikkeli
ORC	Optoelektroniikan tutkimuskeskus (engl. <i>Optoelectronics Research Centre</i> )
<b>P</b>	polarisoituma
<b>p</b>	sähköinen dipolimomentti
PECVD	plasmatehostettu kemiallinen kaasufaasipinnoitus (engl. <i>plasma-enhanced chemical vapour deposition</i> )
Pt	platina
$\tau$	relaksaatioaika
$\tan \delta$	häviötangentti
Ti	titaani
$\chi_e$	sähköinen susceptibiliteetti
$Y$	admittanssi

# 1. JOHDANTO

Sähkömagneettisen spektrin terahertsialue (100 GHz – 10 THz) on taajuuskaista, jota voidaan käyttää monissa sovelluksissa, kuten spektroskopiassa [1], kuvantamisessa [2], metrologiassa [3] ja tiedonsiirrossa [4]. Taajuuskaistan hyödyntämiseksi signaaleja tulee voida tuottaa ja havaita, mikä voi vaatia optisen signaalin muuttamista sähköiseen muotoon esimerkiksi ultranopean fotodiodin avulla [5].

Fotodiodin toimintanopeutta voi rajoittaa muiden seikkojen ohella laitteen rakenteesta johutuva liian suuri kapasitanssi. Tässä tapauksessa tätä kapasitanssia yritetään minimoida eristämällä fotodiodin anodi ja katodi toisistaan sähköeristekalvolla. Käytännössä eristekerros voi kuitenkin vaikeuttaa fotodiodin sähköistä liittämistä, sillä pehmeä eriste voi joustaa liitettäessä, jolloin eristekalvon päällä oleva anodikontakti voi hajota ja liittäminen ei onnistu.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on kehittää valmistusprosessi eristekalvon päälle valmistettavalle anodikontaktille niin, että liitoskohta kestää liittämisen. Valmistusprosessin kehitystyö sisältää fotodiodin anodikontaktia vastaavien rakenteiden valmistamista puhdistilassa ja valmistettujen näytteiden kestävyys- ja kestävyys testauksia lankaliittämällä. Työssä käsitellään myös eristeiden toimintaa teoriassa.

Luvussa 2 tutustutaan eristeiden määritelmään ja ominaisuuksiin sekä niiden toimintaan tasasähkökentässä ja muuttuvassa sähkökentässä. Tästä siirrytään lukuun 3, jossa tutustutaan fotodiodiin ja perehdytään eristekalvon rooliin fotodiodin rakenteessa. Luvussa 4 käsitellään työn näytteiden valmistusta puhdistilassa, siihen käytettyjä menetelmiä ja näytteiden liittämisen testaamisessa käytettyä lankaliittämistä. Varsinaista kehitystyötä, siinä ilmenneitä ongelmia ja kehitetyn rakenteen lankaliitostuloksia käsitellään luvussa 5. Lopuksi luvussa 6 esitellään työstä tehdyt johtopäätökset.

## 2. SÄHKÖERISTEET

Tässä luvussa käsitellään sähköeristeiden teoriaa. Käsittely aloitetaan tutustumalla eristeen määritelmään, jonka jälkeen tarkastellaan eristeiden dielektrisiä ominaisuuksia eli niiden käyttäytymistä ulkoisessa sähkökentässä. Dielektristen ominaisuuksien tarkastelu aloitetaan aineen polarisaatiolla vakiosähkökentässä, ja tarkastelua laajennetaan myös muuttuvan sähkökentän tapaukseen.

### 2.1 Eristeen määritelmä

Materiaalit voidaan luokitella sähköjohtavuuksiensa perusteella sähköeristeisiin, puolijohteisiin ja metalleihin. Tässä alaluvussa tarkastellaan, mihin tämä luokittelu perustuu kiinteissä aineissa.

#### **Energiavyöteoria**

Kiinteiden aineiden ominaisuuksien ymmärtämisessä hyödyllinen malli on energiavyöteoria. Sen pääidea on, että kuten yksittäisessäkin atomissa, vain tietyt energiatilat ovat sallittuja myös kiinteässä aineessa. Kiinteässä aineessa elektronit eivät kuitenkaan ole rajoitettu vain tietyille diskreeteille energiatiloille, vaan sallitut energiatilat muodostavat energiavöitä, joiden väliin jää alueita, joissa ei ole sallittuja energiatiloja. Nämä niin sanotut kielletyt vyöt muodostavat rakenteeseen aukkoja, joita kutsutaan energia-aukoiksi tai energiaraoiksi. Energiavöiden ja -aukkojen muodostama vyö rakenne on kullekin aineelle ominainen, ja sen avulla voidaan selvittää esimerkiksi aineen sähköisiä ja optisia ominaisuuksia. [6, s. 86–89]

Vyörakenteen muodostumista voidaan selittää esimerkiksi ajatuskokeella, jossa kaksi saman alkuaineen atomia ovat aluksi äärettömän kaukana toisistaan. Alussa ne eivät siis vuorovaikuta toistensa kanssa, jolloin molempien atomeiden elektronirakenteet ovat samanlaiset. Jos atomeita aletaan tuoda toisiaan lähemmäs, ne alkavat vuorovaikuttaa, jolloin niiden elektronikonfiguraatioissa tapahtuu merkittäviä muutoksia. Paulin kielto sääntö estää kahden elektronin olemisen samalla kvanttitilalla, jolloin näiden kahden atomin energiatilat hajautuvat alkuperäisten energiatilojen ympärille. [6, s. 86–89]

Kuten kahden atomin tapauksessa, myös kiinteässä aineessa energiatilat ovat hajautu-

neet. Hajautuneita energiatiloja on hyvin paljon, ja ne ovat hyvin lähellä toisiaan, jolloin näitä teoriassa diskreettien energiatilojen joukkoa käsitellään käytännössä jatkuvina energiavöinä. [6, s. 88]

Energiavyöteorian oletuksiin lukeutuu muun muassa se, että aineella on ideaalinen jaksollinen kidehila, minkä vuoksi se ei sellaisenaan sovellu amorfisten aineiden tarkasteluun. Lisäksi on hyvä huomioida, että todellisuudessa aineessa esiintyy kidevirheitä ja epäpuhtauksia, jotka voivat synnyttää paikallisia sallittuja energiatiloja energia-aukkoon. Periaate energiatilojen muodostamista vöistä pätee kuitenkin myös amorfisilla aineilla, koska säännöllisen hilarakenteen puuttumisesta huolimatta aineen atomit vaikuttavat toistensa elektroneihin. [7, s. 16–17]

## Eristeet, puolijohteet ja metallit

Kiinteät aineet voidaan jaotella sähkönjohtavuksiensa mukaan energiavyöteorian avulla. Vyörakenteen ylintä täyttä vyötä kutsutaan valenssivyöksi ja sitä seuraavaa vyötä johtavuusvyöksi. Niiden välille jää energia-aukko, jossa ideaalimateriaalissa ei ole sallittuja energiatiloja. Jos energia-aukon leveys on useita elektronivolteja suurempi kuin Boltzmannin vakio  $k_B$  ja lämpötilasta  $T$  riippuva termien energia  $k_B T$ , materiaali on eriste. Puolijohteilla aukon leveys on samaa luokkaa termisen energian kanssa. Metalleilla puolestaan johtavuusvyö on osin täynnä. [7, s. 16–17]

Nimensä mukaisesti johtavuusvyöllä olevat elektronit johtavat sähköä. Virittyessään esimerkiksi termisesti tai optisesti valenssivyöltä johtavuusvyölle elektronit jättävät valenssivyölle jälkeensä aukon eli elektronin puuttumista kuvaavan näennäishiukkasen. Elektronit ja aukot voivat kuljettaa varauksia eli sähkövirtaa vain, jos niillä on ulkoisessa sähkökentässä mahdollisuus siirtyä uuteen energiatilaan [6, s. 90]. Johtavuusvyöllä olevilla elektroneilla ja valenssivyöllä olevilla aukoilla tämä on mahdollista.

Jos eriste kuitenkin asetetaan riittävän voimakkaaseen sähkökenttään, voi tapahtua läpilyönti (engl. *dielectric breakdown*). Läpilyönti voi aiheuttaa kiinteissä eristeissä merkittävää vahinkoa, sillä se voi muodostaa pysyvän johtavuuskanavan. Eristeen läpilyöntilujuus on suurin sähkökenttä, jonka eriste kestää ilman, että läpilyönti tapahtuu. [8, s. 620–621]

## 2.2 Aineen polarisaatio

Sähköisen eristävyuden lisäksi eristeissä hyvin oleellisia ovat dielektriset ominaisuudet. Ne liittyvät siihen, mitä eristeessä tapahtuu, kun se on ulkoisessa sähkökentässä. Tässä alaluvussa tarkastellaan yksinkertaisella tasolla eristeiden dielektrisiä ominaisuuksia. Tarkastelu aloitetaan siitä, miten sähkökenttä vaikuttaa yksittäiseen atomiin tai molekyyliin. Tämän jälkeen kuvataan ilmiötä makroskooppisesti suhteellisen permittiivisyyden avulla. Tarkoitus on pohjustaa seuraavaa alalukua, jossa käsitellään eristeitä muuttuvassa säh-

kökentässä.

Tärkeä suure dielektrisen käyttäytymisen ymmärtämisessä on sähköinen dipolimomentti, jolla kuvataan kahden yhtä suuren mutta vastakkaismerkkisen varauksen  $Q$  ja  $-Q$  muodostamaa systeemiä eli sähködipolia. Se on yleisesti määritelty

$$\mathbf{p} = Q\mathbf{d}, \quad (2.1)$$

jossa vektorin  $\mathbf{d}$  pituus on varausten etäisyys ja suunta negatiivisesta varauksesta positiiviseen.

## Polarisoituma

Aineen polarisaatio on tärkeä ilmiö, joka tapahtuu ulkoisessa sähkökentässä olevassa eristeessä. Polarisoituminen vaatii energiaa, ja tätä energianvarastointimekanismia hyödynnetään esimerkiksi kondensaattorissa, joka on tärkeä passiivikomponentti elektronikassa.

Yksittäinen neutraali atomi tai molekyyli voidaan polarisoida asettamalla se ulkoiseen sähkökenttään, jolloin sähköinen voima vaikuttaa atomin tai molekyylin positiivisesti varautuneeseen ytimeen ja negatiivisesti varautuneisiin elektroneihin. Tällöin atomiin tai molekyyliin muodostuu dipolimomentti tai olemassa olevat dipolit kääntyvät, jolloin se polarisoituu [8, s. 585].

Ulkoisen sähkökentän  $\mathbf{E}$  ja indusoituvan dipolimomentin  $\mathbf{p}$  välistä riippuvuutta voidaan kuvata yhtälöllä

$$\mathbf{p} = \alpha\mathbf{E}, \quad (2.2)$$

jossa  $\alpha$  on molekyylin tai atomin polarisoituvuus [9, s. 110]. Yhtälö kuvaa, kuinka suuren dipolimomentin  $\mathbf{p}$  atomin kokema sähkökenttä  $\mathbf{E}$  indusoi atomiin, kun sen polarisoituvuus tiedetään.

Makroskooppisesti tällaista polarisaatiota voidaan kuvata aineen polarisoituman  $\mathbf{P}$  avulla. Se määritellään molekyylien lukumäärätiheyden  $n$  ja keskimääräisen dipolimomentin  $\langle \mathbf{p} \rangle$  avulla [9, s. 110]

$$\mathbf{P} = n\langle \mathbf{p} \rangle. \quad (2.3)$$

Polarisoituma voi muodostua eri tavoilla, joihin kaikkiin liittyy oma polarisoituvuutensa. Polarisaatiomekanismeja ovat esimerkiksi seuraavat [8, s. 595–601]:

- **Elektronipolarisaatio**, jossa aineen polarisoituma johtuu elektronien siirtymisestä ulkoisen kentän vaikutuksesta. Kovalenttisissa aineissa sidoselektronit dominoivat tätä mekanismia atomeiden muihin ulkoelektroneihin nähden. Lisäksi elektronit ovat hyvin keveitä, joten tämä polarisaatiomekanismi on nopein.

- **Ionipolarisaatio**, jossa positiivisesti ja negatiivisesti varautuneet atomit tai ionit liikkuvat toisiinsa nähden aiheuttaen polarisoituman. Kun ulkoista sähkökenttää ei ole, ionien väliset dipolimomentit kumoavat toisensa. Sähkökenttä siirtää ioneita, jolloin muodostuu nettodipolimomentti. Yleisesti ionipolarisoituvuus on yli 10 kertaa suurempi kuin elektronipolarisoituvuus.
- **Dipolipolarisaatio** eli orientaatiopolarisaatio, jossa pooliset molekyylit pyrkivät kääntymään siten, että niiden sisäinen dipolimomentti on ulkoisen sähkökentän suuntainen. Molekyylien kääntymistä hidastavat niiden hitausmomentti, molekyylien välinen kitka sekä lämpöliike. Tämä mekanismi riippuu merkittävästi lämpötilasta toisin kuin yllä listatut.
- **Rajapintapolarisaatio** eli avaruusvarauspolarisaatio, jossa varaukset kerääntyvät eri aineiden rajapinnoille heterogeenisessä eristeessä. Myös materiaalin epäpuhtaudet ja erilaiset varauksenkuljettajat vaikuttavat tähän. Tämä on mekanismeista hitain.

## Suhteellinen permittiivisyys ja polarisoituvuus

Muodostetaan seuraavaksi yhteys eristeen mikroskooppisen ja makroskooppisen polarisaatiota kuvaavien ominaisuuksien välille. Mikroskooppisesti ilmiötä kuvaa yhtälössä (2.2) määritelty polarisoituvuus  $\alpha$ , joka aineen lisäksi riippuu myös polarisaatiomekanismista. Vastaava aineen makroskooppinen ominaisuus on sähköinen susceptibiliteetti  $\chi_e$  tai yhtäpitävästi suhteellinen permittiivisyys  $\epsilon_r$ .

Sähköinen susceptibiliteetti kertoo eristeen vasteesta sähkökenttään eli siitä, millaisen polarisoituman  $\mathbf{P}$  ulkoinen sähkökenttä  $\mathbf{E}$  indusoi aineeseen. Sähköinen susceptibiliteetti  $\chi_e$  on määritelty

$$\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (2.4)$$

jossa  $\epsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys [9, s. 114]. Sähköinen susceptibiliteetti on aineen ominaisuus, joka liittyy siihen, kuinka helposti sen molekyylit polarisoituvat. Toisinaan ilmiötä kuvataan myös yhtälöllä

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.5)$$

jossa  $\mathbf{D}$  on sähkövuon tiheys eristeessä ja  $\epsilon_r$  on suhteellinen permittiivisyys eli eristevakio [9, s. 114]. Suhteellista permittiivisyyttä merkitään etenkin elektroniikassa myös merkinnällä  $\kappa$ . Yhtälöitä (2.4) ja (2.5) vertaamalla nähdään, että suhteelliselle permittiivisyydelle pätee

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e. \quad (2.6)$$

On hyvä huomioda, että yleisessä tapauksessa polarisoituman ja sähkökentän välinen yhteys ei ole niin yksinkertainen kuin yhtälössä (2.4). Yleisesti polarisoituma voi riippua

kentästä epälineaarisesti tai permittiivisyys voi anisotrooppisessa ja epähomogeenisessa eristeessä riippua paikasta ja suunnasta, jolloin näiden suureiden tensorikuvaus voi olla tarpeen. Lisäksi jotkin aineet voivat olla niin sanotusti ferrosähköisiä. Tällaisilla aineilla polarisoituma säilyy, vaikka ulkoinen sähkökenttä poistetaan, jolloin niille ei voida määrittää yksikäsitteistä sähköistä susceptibiliteettia. [9, s. 116]

Suhteellisen permittiivisyyden ja polarisoituvuuden välinen yhteys voidaan yksinkertaisimmillaan johtaa tässä luvussa aiemmin esitellyistä yhtälöistä muotoon

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n\alpha_e}{\epsilon_0}, \quad (2.7)$$

jossa  $\alpha_e$  on molekyylin elektronipolarisoituvuus. Tässä tarkastelussa tosin jätetään huomiotta se, ettei molekyylin kokema kenttä yhtälössä (2.2) ole välttämättä ulkoinen kenttä, sillä aineessa myös muut molekyylit voivat vaikuttaa molekyylin kokemaan kenttään.

Tämä molekyylien kokema eli niin sanottu Lorentzin paikallinen kenttä otetaan huomioon Clausiuksen–Mossottin yhtälössä

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n\alpha_e}{3\epsilon_0}, \quad (2.8)$$

joka tässä muodossa pätee poolittomassa aineessa, jossa on kuutiohilakiderakenne tai joka on neste. Poolisille aineille relaatio on monimutkaisempi. [8, s. 593–594]

### 2.3 Eristeet vaihtosähkökentässä

Tämä alaluku käsittelee eristeiden käyttäytymistä vaihtosähkökentässä, jossa eristeiden dielektriset ominaisuudet eroavat merkittävästi staattisen sähkökentän tilanteeseen verrattuna. Alaluvussa tutustutaan lyhyesti kompleksiseen suhteelliseen permittiivisyyteen, dielektriseen relaksaatioon ja eristeiden sijaiskytkentöihin.

Eristeen polarisaatio ei tapahdu välittömästi sähkökentän vaikutuksesta, koska molekyyli- ja molekyylien hitausmomentti hidastavat erityisesti polymeerien ja orgaanisten eristeiden kannalta oleellista dipolipolarisaatiota. Oma osansa on myös lämpöliikkeellä, joka pyrkii satunnaistamaan molekyylien ja dipolien suunnat. On myös huomioitava se, että kaikki polarisaatiomekanismit eivät välttämättä pysy korkeilla taajuuksilla vaihtuvan sähkökentän mukana. Esimerkiksi avaruusvarauspolarisaatio ei hitautensa takia ole enää merkittävä jo melko pienillä taajuuksilla, kun taas elektronipolarisaatiota tapahtuu suurilakin taajuuksilla elektroneiden keveyden takia. [8, s. 603, 608]

## Kompleksinen suhteellinen permittiivisyys

Vaihtosähkökentässä suhteellinen permittiivisyys on kompleksiluku, jota yleisesti merkitään

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (2.9)$$

jossa  $j$  on imaginaariyksikkö. Reaaliosa  $\varepsilon_r'$  kuvaa eristeen polarisaatiota ja imaginaariosan suuruus  $\varepsilon_r''$  eristeessä tapahtuvia energiahäviöitä. Kompleksisuus kertoo myös siitä, että eristeen polarisoitumisen ja ulkoisen sähkökentän välillä voi olla vaihe-ero. Kompleksiselle eristevakiolle on määritelty häviötangenti

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (2.10)$$

jossa häviökulma  $\delta$  on kompleksisen eristevakion ja reaaliakselin välinen kulma. Häviötangenti ja -kulma kertovat eristeen epäideaalisuudesta. [8, s. 605–607]

## Dielektrinen relaksaatio

Tarkastellaan dipolipolarisaatiota tilanteessa, jossa sähkökenttä  $E_0$  on muodostanut molekyyliin yhtälön (2.2) mukaisen dipolimomentin  $p = \alpha_d(0)E_0$ , jossa  $\alpha_d(0)$  on molekyylin dipolipolarisoituvuus staattisessa tilanteessa eli kulmataajuudella  $\omega = 0$ . Hetkellä  $t = 0$  kentän arvo tippuu arvoon  $E$ , jolloin indusoitu dipolimomentti relaksoituu ajan kuluessa arvoon  $p = \alpha_d(0)E$ . Relaksoitumista voidaan kuvata differentiaaliyhtälöllä

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p - \alpha_d(0)E}{\tau} \quad (2.11)$$

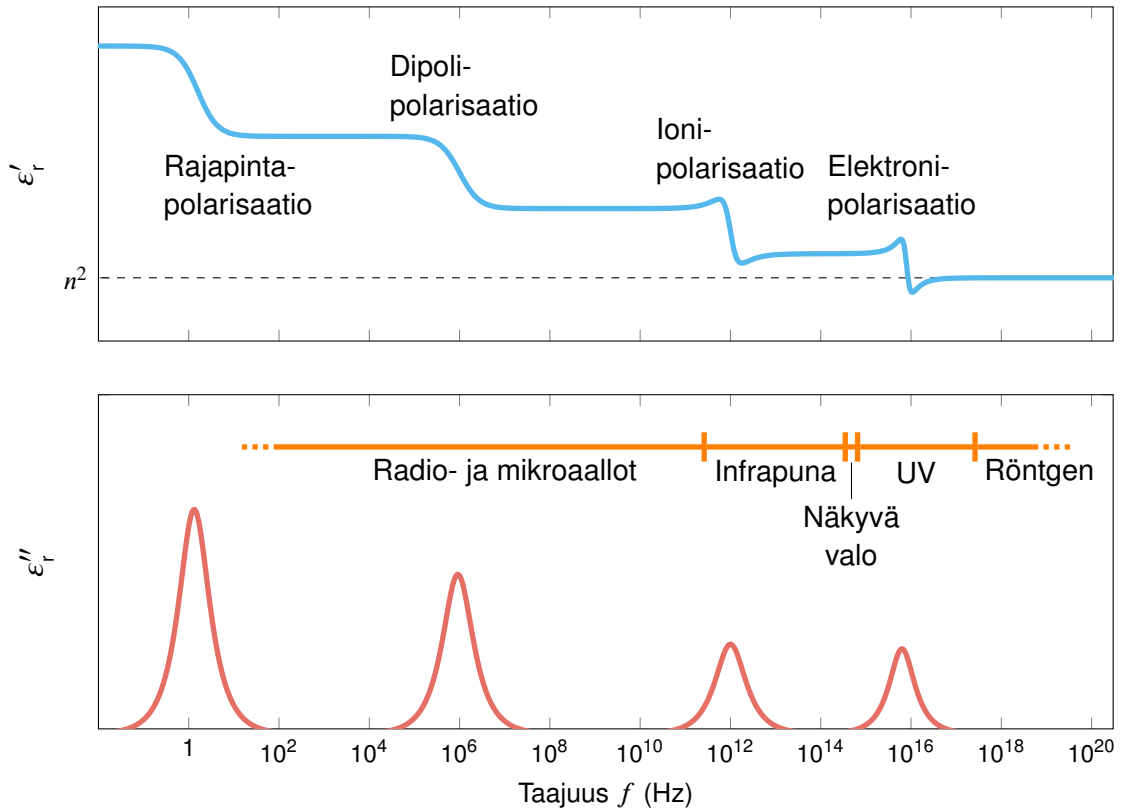
jossa relaksaatioaika  $\tau$  kuvaa keskimääräistä aikaa, joka kuluu dipolien suunnan satunnaisuutukseen. Tämä aika riippuu lämpötilasta. Kun kenttä on muotoa  $E = E_0 e^{j\omega t}$ , saadaan differentiaaliyhtälön ratkaisusta dipolipolarisoituvuus

$$\alpha_d(\omega) = \frac{\alpha_d(0)}{1 + j\omega\tau} \quad (2.12)$$

joka on kompleksiluku. Tämä kertoo suoraan esimerkiksi yhtälön (2.8) kautta siitä, että myös suhteellinen permittiivisyys on kompleksiluku kuten yhtälössä (2.9). Tästä nähdään myös, että suurilla taajuuksilla dipolipolarisoituvuus häviää. [8, s. 604]

Tärkeä huomio yhtälöstä (2.12) on myös se, että se saavuttaa maksimin kulmataajuudella  $\omega = 1/\tau$ . Tämä kuvaa dielektristä resonanssia eli tilannetta, jossa eristevakion imaginaariosa maksimoituu eli häviöt ovat suurimmat. Tästä johtuvat kuvassa 2.1 imaginaariosan paikalliset maksimit taajuuden funktiona. [8, s. 607]

Vastaava käsittely voitaisiin tehdä muillekin polarisaatiomekanismeille, joskin niillä kulla-



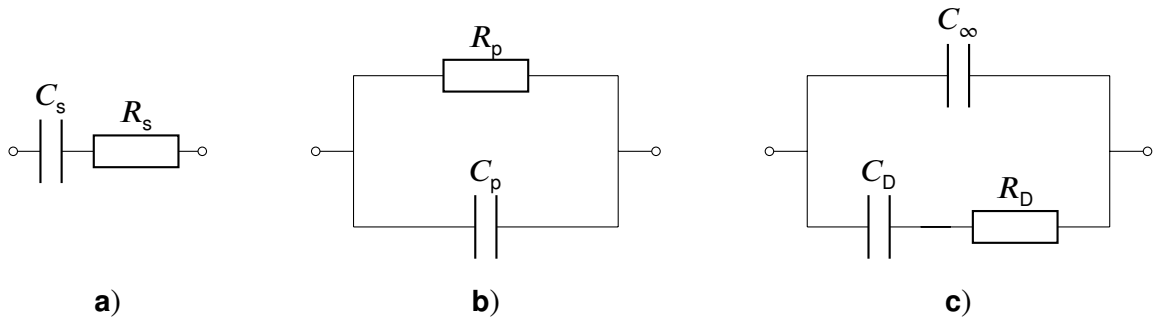
**Kuva 2.1.** Periaatekuva kompleksisen suhteellisen permittiivisyyden yksinkertaistetusta taajuusriippuvuudesta. Taajuuden kasvaessa suhteellisen permittiivisyyden reaali-osa lähenee materiaalin taitekertoimen neliötä  $n^2$ . Kuva on mukailtu lähteestä [7, s. 161–162].

kin on omat ominaisuutensa, jotka vaikuttavat niiden käyttäytymiseen taajuuden funktiona. Ilmiö on koottu polarisaatiomekanismeittain kuvaan 2.1, jossa on esitetty suhteellisen permittiivisyyden reaali- ja imaginaariosien taajuusriippuvuuden periaate.

Kuvan on kuitenkin huomioitava olevan vain periaatteellinen, sillä todellisessa materiaalisessa kuvassa esitetyt siirtymät ja maksimit ovat leveämpiä ja voivat mennä toistensa päälle. Tämä johtuu siitä, että materiaalissa ei ole ainoastaan yhtä relaksaatioaikaa, vaan siihen liittyy pikemminkin relaksaatioaikajakauma. Lisäksi dipolipolarisaatioon liittyy erityishuomio: poolisilla nesteillä dipolipolarisaatiota tapahtuu radio- ja mikroaaltojen taajuusalueella, mutta monilla polymeereilla molekyylien liikkuminen voi olla varsin rajoitettua, minkä takia relaksaatiotaajuus voi olla paljon kuvassa esitettyä pienempi, jopa vain muutaman kilohertsin luokkaa. [7, s. 161–162] Kokeellisia suhteellisen permittiivisyyden mittauksia on koottu esimerkiksi lähteeseen [7, luku 4.7].

## Eristeen sijaiskytkentä

Häviöllistä eristettä voidaan kuvata kapasitanssin ja resistanssin avulla erilaisilla sarjaan- ja rinnankytkennöillä, joista on esitetty joitakin esimerkkejä kuvassa 2.2. Erilaisilla kytken-



**Kuva 2.2.** Joitakin häviöllisten eristeiden sijaiskytkentöjä. Kuva on mukailtu lähteestä [7, luku 4.3].

nöillä voidaan kuvata kompleksisen suhteellisen permittiivisyyden taajuuskäyttäytymistä eri tilanteissa. Näissä kytkennöissä resistanssin roolina on kuvata eristeen häviöitä. On myös hyvä huomioida, että joissakin tilanteissa täsmällisempi eristeen toiminnan kuvaus voi vaatia monimutkaisempia sijaiskytkentöjä kuin tässä on esitetty, kuten induktanssin lisäämistä kytkentään. [7, luku 4.3]

Tarkastellaan esimerkin vuoksi, miten sijaiskytkentä voidaan muodostaa häviölliselle eristerakenteelle. Kuvataan eristettä kondensaattorina, jonka eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys on yhtälön (2.9) mukaisesti kompleksinen. Lisäksi oletetaan, että tämän kondensaattorin kapasitanssi on muotoa  $C = \epsilon_r C_0$ . Tässä  $C_0$  on kondensaattorin kapasitanssi, kun eristemateriaalina on tyhjiö. Tällöin häviöllistä eristettä vastaava admittanssi eli impedanssin käänteisluku on

$$Y = j\omega C = j\omega\epsilon_r' C_0 + \omega\epsilon_r'' C_0. \quad (2.13)$$

Tällainen admittanssi voi vastata esimerkiksi kuvassa 2.2 a) tai b) esitettyä kytkentää, jossa resistanssi ja kapasitanssi riippuvat taajuudesta. Kummastakin yhtälöstä voitaisiin johdattaa lausekkeet eristevakion reaali- ja imaginaariosien suuruuksille. Eri kytkennöistä johdetut lausekkeet kuvaavat eristevakion taajuuskäyttäytymistä eri tavoin. Sopivin kytkentä on se, joka vastaa parhaiten kokeellisia tuloksia. [7, luku 4.3]

Kuvassa 2.2 c) on esitetty hieman monimutkaisempi kytkentä, jolla kuvataan dipolaarisia Debyen eristeitä. Tällaisissa eristeissä läsnä ovat elektroni- ja dipolipolarisaatio. Tämän piirin yhtälöt vastaavat niin sanottuja Debyen yhtälöitä

$$\begin{cases} \epsilon_r' = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{r\text{dc}} - \epsilon_{r\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \\ \epsilon_r'' = \frac{(\epsilon_{r\text{dc}} - \epsilon_{r\infty})(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \end{cases}, \quad (2.14)$$

joissa  $\tau$  on eristeen dipolipolarisaation relaksaatioaika ja  $\omega$  kulmataajuus. Merkinnällä  $\epsilon_{r\text{dc}}$

tarkoitetaan suhteellista permittiivisyyttä staattisessa sähkökentässä. Merkintä  $\epsilon_{r\infty}$  tarkoittaa suhteellista permittiivisyyttä sellaisessa tilanteessa, jossa sähkökentän taajuus on niin korkea, että dipolipolarisoituvuus voidaan jättää huomiotta, mutta elektronipolarisoituvuus on vielä läsnä. [8, s. 611–613]

Debyen yhtälöt kuvaavat Debyen eristettä, jossa on vain yksi relaksaatioaika  $\tau$ . Yhtälöistä on olemassa muunnelmia (esim. Havriliakin–Negamin yhtälö [10]), joilla pyritään ottamaan huomioon relaksaatioaikajakaumat erityisesti polymeereissä.

### 3. ERISTEKALVO FOTODIODISSA

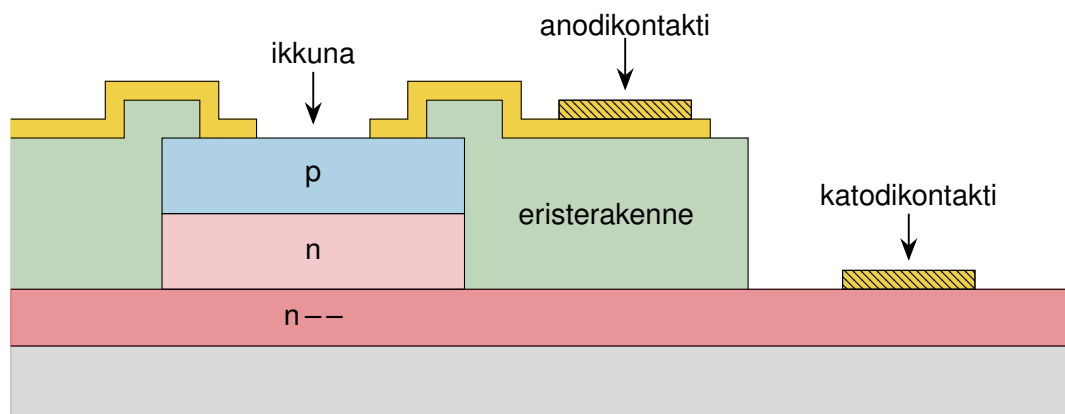
Tässä luvussa käsitellään eristekalvon merkitystä fotodiodin elektrodissa. Käsittely aloitetaan tutustumalla fotodiodiin ja sen rakenteeseen. Tämän jälkeen tutkitaan, millainen fotodiodin taajuusvaste karkeasti on. Lopuksi keskitytään siihen, millaisella eristekalvolla saavutetaan paras taajuuskäyttäytyminen ja millaisia muita ominaisuuksia eristekalvolta vaaditaan.

#### 3.1 Fotodiodi

Fotodiodi on optoelektroninen laite, joka tuottaa sähköisen signaalin, kun se absorboi fotoneita. Tämän työn kohteena oleva fotodiodi on niin sanottu UTC-fotodiodi (engl. *uni-traveling-carrier photodiode*), jossa hyödynnetään ainoastaan elektroneja varauksenkuljettajina niiden nopeuden vuoksi [11].

Fotodiodin yksinkertaistettu rakenne on esitetty kuvassa 3.1. Substraatin päällä on kerros vahvasti seostettua n-tyyppin puolijohdetta ( $n--$ ), jonka päällä ovat n- ja p-tyyppin puolijohdetet päällekkäin niin sanottuna mesana. Ylimpänä olevan p-tyyppin puolijohdeten päällä on ikkuna. Fotonit pääsevät ikkunasta mesaan, jossa olevaan absorptiokerrokseen ne voivat absorboitua. Fotonien absorboituttua muodostuu elektroni-aukkopareja, jotka synnyttävät niin sanotun fotosähkövirran [12, luku 3].

Fotodiodia voidaan käyttää kahdessa eri toimintatilassa: fotojännitteen tai fotosähkövirran



**Kuva 3.1.** Tähän työhön liittyvän fotodiodin yksinkertaistettu rakenne.

lähteenä. Kun fotodiodia käytetään fotojännitteen lähteenä, sen elektrodeihin on kytketty suuri impedanssi, jonka yli muodostuu jännite. Toisin kuin fotosähkövirta, fotojännite ei käyttäydy lineaarisesti absorboituneiden fotoneiden lukumäärän funktiona, mikä voi hankaloittaa tarkkaa optisen signaalin muunnosta sähköiseksi. Fotojännitetilassa ei myöskään saavuteta parasta mahdollista fotodiodin toimintanopeutta. Toimintatila on kuitenkin varsin hyödyllinen esimerkiksi tehon tuottamiseen optimoiduissa fotodiodeissa, kuten aurinkokennoissa. [12, luku 3]

Fotosähkövirtatilassa fotodiodi on estosuuntaisesti biasoitu. Tämä tarkoittaa, että sen yli vallitseva jännite on sen suuntainen, ettei sen läpi pääse kulkemaan sähkövirtaa vuotovirtaa lukuun ottamatta. Kun diodia valaistaan tässä tilassa, syntyy fotosähkövirta, joka on merkittävästi suurempi kuin vuotovirta. Fotosähkövirta riippuu lineaarisesti absorboituneiden fotoneiden lukumäärästä ja sitä on helppo mitata. Nämä seikat tekevät tästä toimintatilasta hyvän sellaisiin käyttötarkoituksiin, joissa tarkka optisen signaalin muunnos sähköiseen on tarpeen. Tässä tilassa voidaan myös saavuttaa suurempi toimintanopeus kuin fotojännitetilassa. [12, luvut 3–4]

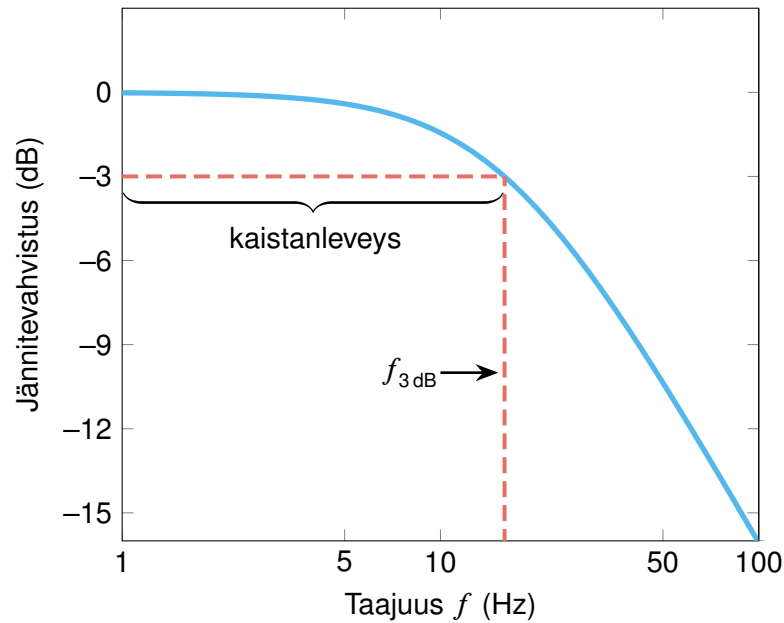
## 3.2 Fotodiodin taajuusvaste

Fotodiodin toimintaa voidaan kuvata esimerkiksi neljän eri tekijän avulla: *Ilmaisuvaste* kuvaa fotodiodin tuottaman fotosähkövirran ja sitä kohti tulevan optisen tehon suhdetta. *Ilmaisuvaste* riippuu muun muassa kohti tulevan valon aallonpituudesta. *Kvanttihyötysuhde* kertoo, kuinka suuri osuus fotodiodia kohti tulevista fotoneista synnyttää johtavuuselektronin. *Vasteaika* määrittää sen, mikä on lyhyin optinen pulssi, jonka fotodiodi kykenee tunnistamaan. *Kohina* voi vaikeuttaa pienien signaalien havaitsemista. Sitä voi aiheuttaa esimerkiksi fotodiodin pimeävirta eli sen läpi kulkeva virta silloin, kun komponenttia ei valaista. [12, luku 3]

Tähän työhön liittyvää fotodiodia suunnitellaan tiedonsiirtoon, jossa edellä mainituista seikoista hyvin oleellinen on vasteaika. Suuri tiedonsiirtonopeus vaatii lyhyen vasteajan: mitä lyhyempiä pulsseja ilmaisimien tunnistaa, sitä enemmän tietoa voidaan siirtää samassa ajassa. Vasteajan asemesta voidaan puhua myös taajuudesta, jolla fotodiodi toimii. Lyhyt vasteaika vastaa suurta toimintataajuutta.

Fotodiodin suurinta mahdollista toimintataajuutta rajoittavat sekä sisäiset että ulkoiset tekijät. Sisäiset tekijät voivat liittyä esimerkiksi fotoneiden absorption synnyttämien varaustenkuljettajien ajautumisnopeuteen. Ulkoiset tekijät taas liittyvät sähköisiin parametreihin, kuten fotodiodin ja siihen kytketyn ulkoisen piirin resistanssiin ja kapasitanssiin. Hyvin usein toimintataajuutta rajoittavat nimenomaan ulkoiset tekijät, joihin tässä työssä keskitytään. [12, luku 4].

Fotodiodi voidaan kytkeä sähköisesti virtapiiriin kahden elektrodinsa avulla. Yhteys p-



**Kuva 3.2.** Yksinkertaisen RC-alipäästösuotimen taajuusvaste, kun sen RC-aikavakio on 10 ms.

tyypin puolijohteeseen muodostetaan fotodiodin anodikontaktin avulla, joka on eristetty katodikontaktista eristerakenteella. Eristeestä aiheutuu fotodiodin elektrodien välille kapasitanssi, joka voi vaikuttaa merkittävästi fotodiodin käyttäytymiseen korkeilla taajuuksilla. Muita taajuuskäyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi fotodiodin tyhjenysalueeseen liittyvä kapasitanssi ja laitteen paketoinnissa käytettävistä kultalangoista aiheutuvat parasiittiset kapasitanssi ja induktanssi.

Taajuusvaste kuvaa, miten systeemin lähtösignaalin voimakkuus riippuu tulosignaalin taajuudesta. Fotodiodien tapauksessa taajuusvaste vastaa usein melko hyvin RC-alipäästösuotimen taajuusvastetta, kuten on havaittu sekä simuloimalla (esimerkiksi [13]) että koekallisesti (esimerkiksi [14]). Tällainen taajuusvaste on esitetty kuvassa 3.2.

Taajuusvasteeseen liittyy olennaisesti 3 desibelin rajataajuus  $f_{3\text{ dB}}$ , joka kertoo, milloin lähtösignaalin voimakkuus laskee 3 desibelin verran eli milloin sen teho puolittuu. Rajataajuus voidaan yksinkertaisen RC-piirin tapauksessa johtaa helposti tarkastelemalla kondensaattorin yli olevan jännitteen suhdetta sisääntulojännitteeseen, jolloin saadaan

$$f_{3\text{ dB}} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (3.1)$$

jossa  $R$  on piirin resistanssi ja  $C$  kapasitanssi. Resistanssin ja kapasitanssin tuloa kutsutaan resistiivis-kapasiitiviseksi aikavakioksi eli RC-aikavakioksi. Kuten yhtälöstä nähdään, aikavakio halutaan minimoida mahdollisimman suuren kaistanleveyden saavuttamiseksi.

### 3.3 Eristekalvon materiaali

Elektrodit eristävään eristekalvoon liittyy kapasitanssi, joka vaikuttaa omalta osaltaan fotodiodin RC-aikavakioon. Koska aikavakio halutaan minimoida mahdollisimman suuren toimintataajuuden saavuttamiseksi, eristekalvon materiaali täytyy valita huolella. Materiaalin valinnassa tärkeitä huomioon otettavia seikkoja ovat esimerkiksi sähköiset, mekaaniset ja termiset ominaisuudet sekä se, millainen sen valmistusprosessi on. Taajuuskäytettyäytymisen kannalta tärkeimpiä yksittäisiä eristemateriaalin ominaisuuksia on kuitenkin pieni suhteellinen permittiivisyys.

Matalan eristevakion eristeiksi (engl. *low- $\kappa$  dielectrics*) kutsutaan materiaaleja, joiden suhteellinen permittiivisyys on pienempi kuin piidioksidilla ( $\epsilon_r \approx 4$ ), joka on yleisesti käytetty materiaali esimerkiksi mikropiirien (engl. *integrated circuit, IC*) valmistuksessa. Mikropiirien pienentynyt koko ja niiden toiminnan nopeuttaminen synnytti tarpeen matalan eristevakion materiaalien tutkimiseen. [15]

Vaikka mielenkiinto näiden materiaalien kehittämiseen tulikin muualta, niillä on käyttöä myös muissa mikroelektronikan sovelluksissa, kuten tähän työhön liittyvässä fotodiodissa. Haluttuja materiaalin ominaisuuksia ovat pienen suhteellisen permittiivisyyden ohella esimerkiksi seuraavat:

- **Hydrofobisuus:** Materiaaliin absorboituva vähäinenkin kosteus voi nostaa sen suhteellista permittiivisyyttä huomattavasti veden korkean eristevakion ( $\epsilon_r \approx 80$ ) vuoksi. Tämän vuoksi materiaalin tulee sitoa mahdollisimman vähän kosteutta. [15]
- **Mekaaninen kestävyys:** Materiaalin tulee kestää esimerkiksi laitteen liittämisenä syntyvää mekaanista rasitusta. Rasitusta voi syntyä myös esimerkiksi laitteen eri materiaalien erilaisten lämpölaajenemiskertoimien takia. [15]
- **Valmistusvaiheiden sietokyky:** Puolijohdelaitteiden valmistus voi sisältää korkeissa lämpötiloissa tehtäviä vaiheita ja kemiallisia ja fysikaalisia syövytysprosesseja, jotka materiaalin pitää kestää. [15]
- **Yhteensopivuus muiden materiaalien kanssa:** Tähän liittyviä haasteita voivat olla esimerkiksi eristemateriaalin heikko tarttuvuus muihin materiaaleihin ja liian suuret erot materiaalien lämpölaajenemiskertoimien välillä. [15]
- **Matalat häviöt:** Eristeiden dielektrisiä häviöitä on käsitelty tarkemmin aluvuossa 2.3. Häviöt voivat heikentää laitteen taajuusvastetta.

Matalan eristevakion materiaaleja ovat esimerkiksi fluorilla seostettu piidioksidi eli fluoro-silikaattilasi, hiilellä seostetut vetyä sisältävät oksidieristeet (SiCOH) ja monet polymeerit, kuten polyimidit ja polytetrafluorieteeni (PTFE). Lisäksi on kehitetty huokoisia eristeitä, joissa materiaalissa ovat pienet ilmataskut pienentävät eristevakiota. [16]

Tässä työssä eristekalvon materiaalina toimii bentsosyklobuteenipohjainen polymeeri

(engl. *benzocyclobutene*, BCB), jolla on hyvät ja vakaat dielektriset ominaisuudet laajalla taajuusalueella. Materiaalin valmistajan mukaan sen eristevakio on noin 2,65 taajuusalueella 1–20 GHz ja häviötangentti 0,0008 [17]. Myös muut ovat mitanneet samaa suuruusluokkaa olevia arvoja [18, 19].

## 4. NÄYTTEIDEN VALMISTUS JA SIIHEN KÄYTETYT MENETELMÄT

Työn kokeellisessa osuudessa on tarkoitus tutkia, millainen eristekalvon sisältävän elektrodin metallirakenteen tulee olla, jotta se kestää fotodiodin liittämisen muuhun virtapiiriin. Tässä luvussa käsitellään eristekalvon sisältävän elektrodin valmistuksessa käytettäviä menetelmiä. Menetelmät esitellään samassa järjestyksessä kuin valmistus tapahtuu. Lisäksi luvussa käsitellään lankaliittämistä eli liitântätekniikkaa, jota käytetään näytteiden liittämisen testaamisessa.

### 4.1 Näytteen rakenne

Tässä työssä valmistetaan näytteitä, jotka sisältävät fotodiodin anodikontaktia vastavia rakenteita. Valmistus tapahtuu pohjamateriaalin eli substraatin päälle. Tässä työssä substraattina toimii pii (Si). Substraatin päälle kasvatetaan 25 nm paksu kerros piidioksidia ( $\text{SiO}_2$ ). Tämä kerros päällystetään BCB-eristekalvolla, jonka tavoitepaksuus on 2  $\mu\text{m}$ . Eristekalvon päälle kasvatetaan 230 nm paksu ohutkalvo piidioksidia. Prosessiin voi kuulua myös näytteestä riippuen erilaisia pintakäsittelyitä. Kaikissa näytteissä päällimmäiseksi jää metallirakenne, joka voi koostua esimerkiksi nikkelistä (Ni), titaanista (Ti), platinasta (Pt) ja kullasta (Au).

### 4.2 Valmistaminen puhdastilassa

Puhdastila on tila, jossa ilmassa leijuvien hiukkasten määrää kontrolloidaan. Myös muita olosuhteita, kuten lämpötilaa ja ilmankosteutta voidaan kontrolloida. Tämän työn näytteet ja yleisestikin puolijohdelaitteet valmistetaan puhdastilassa, sillä laitteiden rakenteiden koko voi olla samaa luokkaa esimerkiksi pölyhiukkasten kanssa. Tällöin näytteen pinnalle joutuvat hiukkaset voivat haitata laitteiden valmistusta ja toimintaa. Toinen syy puhdastilatyöskentelyyn ovat vakio-olosuhteet, jotka parantavat valmistusprosessien toistokelpoisuutta.

## Substraatin valmistelu

Näytteiden valmistus aloitetaan substraatin valmistelulla. Substraatit valmistetaan kiekkoiksi, joiden halkaisija on tyypillisesti esimerkiksi 2, 4, 6 tai 8 tuumaa. Tässä työssä prosessoitava näyte on kahden tuuman kiekon neljännes. Ennen varsinaista prosessointia kiekosta leikataan halutunlainen pala. Tämä tapahtuu tekemällä ensin timanttikynällä merkintä kohtaan, josta palan halutaan leikkautuvan, minkä jälkeen pala murretaan merkinnän kohdalta.

Kun kiekosta on leikattu halutunlainen pala, se tulee puhdistaa pilkkomisessa mahdollisesti syntyneistä pirstaleista. Pirstaleet puhalletaan pois paineistetulla tyvellä, minkä jälkeen näyte puhdistetaan myös pienimmistä roskista ja mahdollisista orgaanisista jäämistä. Tämä tehdään upottamalla näyte asetoni- ja isopropanolikylpyihin. Näissä liuottimisessa ollessaan näyte on samalla myös ultraäänikylvyssä, jolla yritetään tehostaa näytteen puhdistumista. Kylpyjen jälkeen näyte kuivataan tyvellä.

## Ohuen piidioksidikerroksen kasvatus

Eristerakenteen valmistus aloitetaan kasvattamalla 25 nm piidioksidia puhdistetun substraatin päälle. Tämän ohutkalvon kasvattamiseen käytetty tekniikka on nimeltään plasmatehostettu kemiallinen kaasufaasipinnoitus (engl. *plasma-enhanced chemical vapour deposition*, PEVCD). Tätä tekniikkaa käytetään puolijohdelaitteiden valmistuksessa esimerkiksi eristeohutkalvojen kasvattamiseen [6, s. 187, 193].

Kemiallisessa kaasufaasipinnoituksessa kaasumaiset lähtöaineet reagoivat kemiallisesti ja muodostavat kiinteän ohutkalvon substraatin pinnalle. Korkealaatuisten kerrosten kasvattaminen järkevällä nopeudella vaatii hyvin korkeita lämpötiloja, mutta plasman avulla lähtöaineiden reaktioita voidaan edesauttaa, jolloin pinnoituslämpötilan ei tarvitse olla niin korkea [20, s. 494–495]. Plasma sytytetään kammioon radiotaajuisella sähkökentällä, jossa kevyet elektronit saavuttavat suuremman liike-energian kuin raskaat ionit [6, s. 192].

Kerrosten kasvattaminen tapahtuu asettamalla näyte kammioon, minkä jälkeen kammioon pumpataan tyhjiö. Kammioon päästetään lähtöaineiksi dityppioksidia ( $N_2O$ ) sekä typen ( $N_2$ ) ja silaanin ( $SiH_4$ ) seosta, minkä jälkeen kasvatusprosessi käynnistetään. Tarkemmat prosessiparametrit on esitetty taulukossa 4.1.

## Polymeerieristekalvon valmistus

Ohuen piidioksidikalvon päälle valmistetaan varsinainen polymeerieristekalvo, jonka tarkoituksesta on kerrottu tarkemmin luvussa 3. Eriksenä toimii CYCLOTENE™ 3022-46 bisbentsosyklobuteeni, jonka valmistaja on Dow Chemical Company. Ennen kuin BCB levitetään näytteen pinnalle, näytteelle asetetaan noin 200  $\mu$ l saman valmistajan AP3000-

**Taulukko 4.1.** Piidioksidin kasvattamiseen käytetyt parametrit PECVD:llä.

N <sub>2</sub> :SiH <sub>4</sub> (2 %) -virtaus	470 sccm
N <sub>2</sub> O-virtaus	710 sccm
RF-teho	20 W
Paine	1000 mTorr
Lämpötila	300 °C
Kerros­paksuus	25 nm / 230 nm

adheesionedistettä, joka parantaa eristeen kiinnittymistä piidioksidin pinnalle. Näytettä pyöritetään nopeasti (3000 rpm) 20 sekunnin ajan, jolloin adheesionediste leviää näytteelle. Edisteen linkoamisen jälkeen näyte asetetaan kuumalle (120 °C) lämpölevylle 3 minuutiksi. Lämpökäsittely voi parantaa BCB:n kiinnittymistä entisestään [17].

BCB levitetään näytteen pinnalle heti, kun näyte otetaan lämpölevyltä. Näytteen päälle pipetoidaan BCB:tä noin 200–300 µl ja T1100-liuotinta noin 0,5 ml, minkä jälkeen polymeeri levitetään linkoamalla 20 sekunnin ajan kierrosnopeudella 3000 rpm. Liuottimen tarkoitus on pitää näytteen alapuoli puhtaana. Linkoamisen jälkeen näyte asetetaan kuumalle (120 °C) lämpölevylle 3 minuutiksi, jotta ylimääräiset liuottimet haihtuvat ja polymeeri kovettuu niin, että näytettä voidaan käsitellä.

Tämän jälkeen näytteelle tehdään noin 3 tunnin pituinen lämpökäsittely, jossa polymeeri kovettuu kokonaisuudessaan. Tämä käsittely tehdään tyhjiössä, jossa lämpötila on kuumimmillaan noin 300 °C. Lopuksi BCB-kalvon päälle kasvatetaan 230 nm paksu kerros piidioksidia PECVD:llä.

## Kuviointi

Näytteen pinnalla halutaan lopulta olevan anodikontakteja vastaava kuvio. Puolijohdelaitteiden valmistuksessa kuviot voidaan tuottaa esimerkiksi optisen litografian avulla, jossa hyödynnetään tyypillisesti ultraviolettivaloa kuvion tekemisessä. Koska optisella litografialla saavutettava resoluutio on diffraktiorajoitettu [6, s. 189], joskus voi olla käyttöä paremman resoluution kuviointitekniikoille, joita ovat esimerkiksi nanopainatuslitografia (engl. *nanoimprint lithography*) [21] ja elektronisuihkulitografia (engl. *electron-beam lithography*) [22]. Tässä työssä käytetään kuitenkin ultraviolettilitografiaa.

Yksinkertaistettuna optisessa litografiassa kuvio tuotetaan seuraavasti: Valolle herkkä kemikaali, valoresisti, levitetään näytteen pinnalle esimerkiksi linkoamalla. Levittämisen jälkeen resisti altistetaan määrätystä kohdista ultraviolettivalolle ja kehitetään, jolloin resistin tyyppin mukaan joko valottuneet tai valottumattomat resistin alueet liukenevat. Resistin tyyppin mukaan prosessiin voi kuulua erilaisia paistoja eli lämpökäsittelyitä. Lopulta jäljelle jää halutunlainen kuvio, jonka alueelta näytteen pinta on paljaana. Muuten näytteen



**Kuva 4.1.** Litografiavaiheen periaate.

pinnalla on resistiä.

Valoresistejä on erilaisia: negatiivisia ja positiivisia resistejä sekä kuvankääntöresistejä. Positiivisessa resistissä valotetut alueet liukenevat kehityksessä, negatiivisessa resistissä valottomat. Kuvankääntöresisti voi käyttäytyä joko positiivisen tai negatiivisen resistin kaltaisesti riippuen prosessista. Tässä työssä resistin halutaan käyttäytyvän negatiivisen resistin tavoin, koska tällöin resistikuvioon muodostuu alileikkautunut profiili, josta voi olla etua myöhemmissä prosessivaiheissa.

Tässä työssä tehty litografiaprosessi on esitetty kuvassa 4.1. Ennen resistin levittämistä näytteen pinnalle höyrytetään heksametyylidisilatsaania (HMDS), joka toimii adheesiodisteinä. Tämän jälkeen näytteelle levitetään linkoamalla MicroChemicals GmbH:n valmistamaa AZ 5214 E -kuvankääntöresistiä (3000 rpm, 40 s). Levittämisen jälkeen näyte asetetaan esipaistoon (1 min, 100 °C), jossa resistin liuotinta haihtuu.

Esipaiston jälkeen resisti on valmis valotettavaksi. Näyte asetetaan litografiainmaskin alle, joka on kuvioitu niin, että halutut alueet ovat valoa läpäisemättömiä. Näytettä valaistetaan maskin läpi ultraviolettivalolla, jolloin paljaat alueet valottuvat. Tässä tapauksessa prosessiin kuuluu valotuksen jälkeinen kuvankääntöpaisto (2 min, 115 °C) ja ylivalotus, jossa näyte altistetaan ultraviolettivalolle kauttaaltaan ilman maskia. Lopulta resisti kehitetään MicroChemicals GmbH:n AZ 726 MIF -kehittäjällä 30 sekunnin ajan, minkä jälkeen haluttu kuvio on tuotettu näytteelle.

## Metallien höyrytys

Kuvioinnin jälkeen määrättyt alueet näytteen pinnalta ovat paljaana. Näille alueille tehdään metallikontaktit. Tässä työssä metallit pääasiassa höyrytetään kerroksittain näytteen pinnalle elektronisuihkuhöyrytimellä. Höyryttämisessä sovelletaan elektronisuihkun avulla tapahtuvaa fysikaalista kaasufaasipinnoitusta (engl. *electron-beam physical vapour deposition*, EBPVD).

Metallit höyrystetään ala- ja yläkammioista koostuvalla höyrystimellä. Kammiot on erotettu toisistaan porttiventtiilillä, jonka avulla alakammio voidaan pitää tyhjiössä, kun yläkammio avataan näytteen asettamista varten. Näin varmistetaan se, etteivät alakammiossa sijaitsevat höyrystettävät metallit altistu ilmalle ja pääse hapettumaan. Näytteen lataamisen jälkeen yläkammioon pumpataan tyhjiö, minkä jälkeen porttiventtiili avataan ja kammiot yhdistyvät. Höyrystämistä käytetään tässä työssä pääasiassa noin 50–250 nm:n paksuisten nikkeli-, titaani-, platina- ja kultakerrosten tekemiseen. Tyypillisesti höyrystämisenopeus on luokkaa 0,1–0,2 nm/s.

Alakammiossa sijaitsevat höyrystettävät metallit omissa sulatuskupeissaan sekä katodilanka, josta irrotetaan elektroneja kuumentamalla sitä. Irronneet elektronit kiihdytetään sähkökentässä ja ohjataan sähkömagneetilla sulatuskuppiin. Riittävän voimakas elektronisuihku alkaa sulattaa ja lopulta höyrystää metallia sulatuskupista ylöspäin kohti yläkammioon asetettua näytettä. Näytteeseen osuessaan höyrystynyt metalli muodostaa kiinteän kerroksen.

Metallia höyrystyy hyvin laajalle alueelle kammioon, jolloin vain osa siitä päätyy näytteen pinnalle. Osa kerrostuu näytepitimen vieressä sijaitsevan pietsosähköisen kvartsikiteen päälle, jota käytetään höyrystämisen prosessin seuraamiseen. Kiteelle höyrystynyt metalli muuttaa sen värähtelytaajuutta, jonka avulla voidaan laskea höyrystysnopeus ja höyrystyneen kerroksen paksuus.

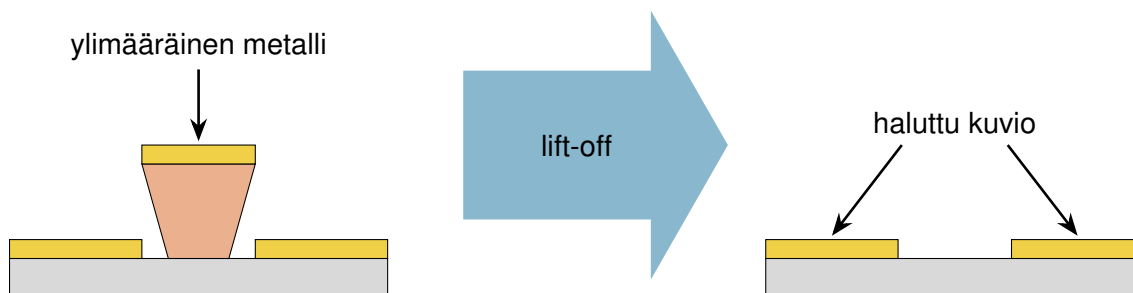
## Kemiallinen nikkelöinti

Höyrystämisen lisäksi joissakin näytteissä hyödynnettiin myös autokatalyyttistä kemiallista nikkelöintiä (engl. *electroless nickel plating*) paksuhkon nikkelikerroksen tekemiseksi. Joihinkin tämän työn näytteisiin halutaan paksu, noin 2 µm:n paksuinen nikkelikerros, jonka höyrystäminen ei ole käytännöllistä. Kerroksen tekemiseksi käytetään kemiallista nikkelöintiä, joka perustuu metalli-ionien autokatalyyttiseen pelkistymiseen metalloitavalle pinnalle. Menetelmä on autokatalyyttinen, sillä reaktiota edistää nimenomaan nikkeli eli metalloitava aine itse. [23, s. 447–448]

Ennen kemiallisesti pinnoitettua nikkeliä (engl. *electroless nickel*, EN) näytteelle höyrystetään titaania (50 nm), platinaa (50 nm), kultaa (100 nm) ja nikkeliä (50 nm). Nikkeliä höyrystetään päällimmäiseksi, jotta nikkeli pinnoittuisi kemiallisesti mahdollisimman hyvin höyrystetyn nikkelin päälle. Tämän jälkeen näyte laitetaan Sigma-Aldrichin valmistamaan Nিকেlex-pinnoitusliuokseen, jossa nikkeli saostuu kemiallisesti näytteelle.

Pinnoituksen aikana tapahtuu hapetus-pelkistysreaktio, jossa pelkistiminä toimivat hypofosfaatti-ionit ( $\text{H}_2\text{PO}_2^-$ ) pelkistävät kompleksisia nikkeli-ioneita metallikerrokseksi näytteen pinnalle. Liuos on puskuroitu reaktiolle suotuisan happamuuden ylläpitämiseksi. [24]

Kemiallisen pinnoittamisen jälkeen näytteeltä poistetaan resisti lift-off-menetelmällä, jo-



**Kuva 4.2.** Periaatekuva lift-off-vaiheesta.

ka esitellään myöhemmin. Resistin poistamisen jälkeen näytteelle tehdään lämpökäsittely, jossa kemiallisesti pinnoitettu nikkeli kovettuu [23, s. 455]. Tämän jälkeen näyte kuvioidaan uudelleen samalla kuviolla uudelleen ja sen päälle höyrystetään Ti/Pt/Au-kontaktimetalli. Lopuksi resisti poistetaan lift-off-vaiheessa.

### Lift-off-vaihe

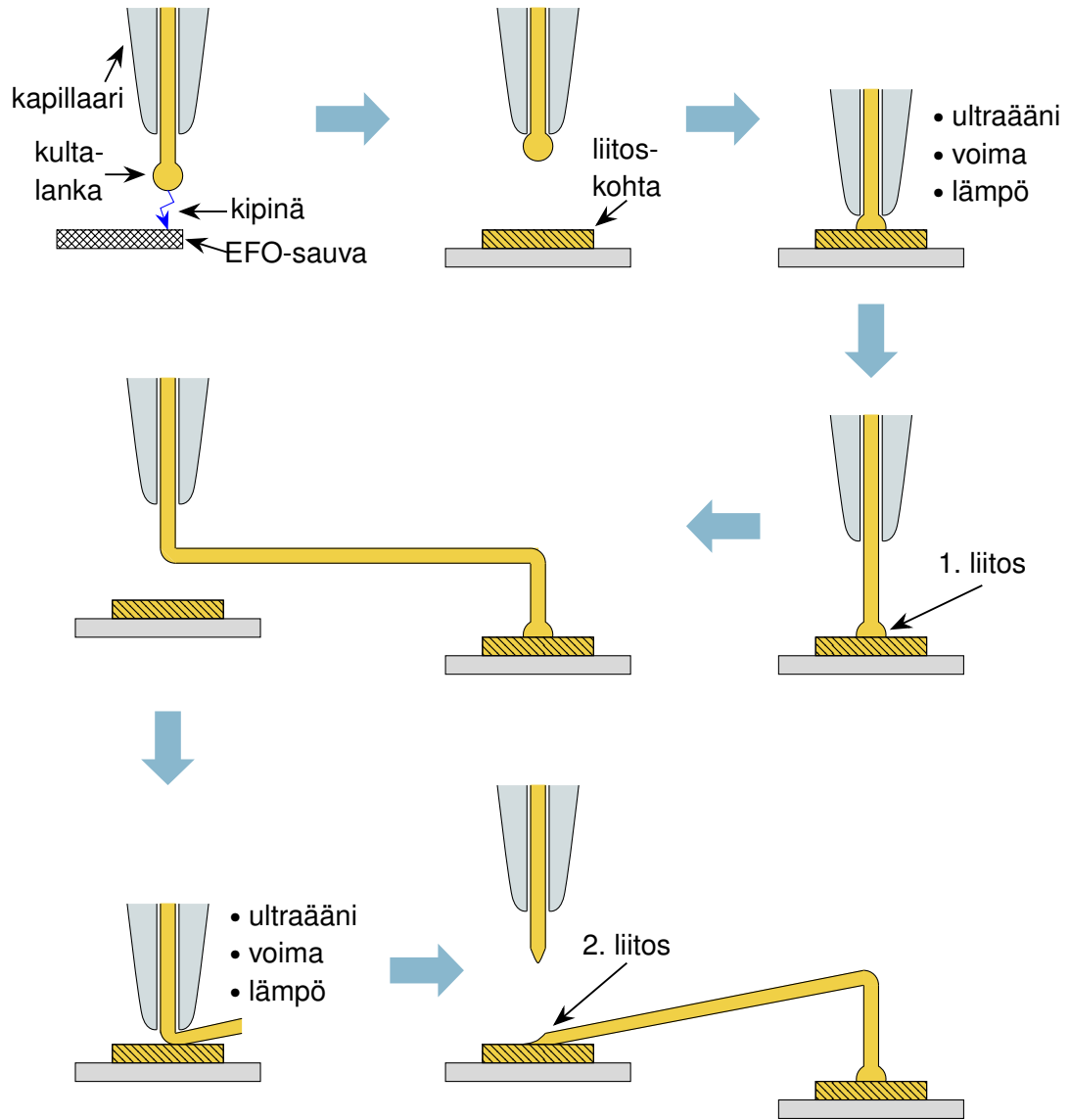
Metalloinnin jälkeen näyte on kauttaaltaan metallikerrosten peitossa. Ylimääräinen metalli poistetaan niin sanotulla lift-off-tekniikalla, jossa liuotetaan resisti pois ylimääräisen metallin alta. Lift-off-vaiheen periaate on esitetty kuvassa 4.2.

Tätä vaihetta varten näyte upotetaan S1165-liuottimeen, joka on kuumennettu (80 °C). Näytteen kylvyssä viettämä aika voi riippua siitä, kuinka helposti liuos pääsee liuottamaan metallin alla olevaa resistiä. Yleensä näytettä kylvetetään kuitenkin vähintään 10 minuuttia. Liuotinkylvyn jälkeen näyte huuhdellaan deionisoidulla vedellä ja kuivataan typpellä.

### 4.3 Lankaliittäminen

Näytteen varsinaisen valmistuksen jälkeen näytteen pinnalla on fotodiodin anodikontaktia vastaava rakenne. Tässä työssä kontakti yhdistetään sähköisesti alustaan lankaliitoksella. Lankaliittäminen (engl. *wire bonding*) on yksi monista tekniikoista, joita käytetään integroitujen piirien paketoinnissa. Muita tekniikoita ovat esimerkiksi kääntösiruliittäminen (engl. *flip-chip bonding*) [25], automaattinen teippiasennus (engl. *tape automated bonding*) [26] ja kiekkotason paketointi (engl. *wafer-level packaging*) [27]. Lankaliittäminen on kuitenkin näistä kehittynein ja selvästi eniten käytetty menetelmä [28, luku 1].

Lankaliittämisessä kontaktiin liitetään ohut metallilanka. Useimmiten se on kultaa, mutta myös esimerkiksi kupari- ja alumiinilankoja voidaan käyttää. Liitoksen tekemiseen on kaksi eri tapaa: palloliitosmenetelmä (engl. *ball bonding*) ja kiilaliitosmenetelmä (engl. *wedge bonding*). Kummassakin tavassa liittäminen aloitetaan painamalla lanka kontaktia vasten ja kohdistamalla siihen lämpöä ja painetta. Samalla lankaa hangataan ultraäänitaajuudella liitoskohtaa vasten, jolloin lanka ja liitoskohta hitsautuvat yhteen. [28, luvut 1–2]



**Kuva 4.3.** Periaatekuva palloliitosmenetelmän vaiheista. Kuva on mukailtu lähteestä [28, luku 1].

Tässä työssä näytteiden liittämiseen käytetään palloliitosmenetelmää, jonka vaiheet on esitetty kuvassa 4.3. Siinä kultalankaa syötetään ohuen hiusputken eli kapillaarin läpi. Menetelmän ensimmäisessä vaiheessa langan pään lähelle tuodaan EFO-sauva (engl. *electronic flame-off wand*), jonka aiheuttama sähkökipinä sulattaa kultalangan pään palloksi.

Seuraavaksi langan päässä oleva pallo vedetään kapillaaria vasten ja kapillaari viedään liitoskohdan kohdalle, minkä jälkeen lankaa painetaan liitoskohtaa vasten. Tällöin paineen, lämmön ja ultraäänitaajuudella tapahtuvan värähtelyn avulla muodostuu ensimmäinen liitos eli palloliitos. Tämän jälkeen kapillaari nostetaan ja siirretään seuraavan liitoskohdan ylle. Toinen liitos muodostetaan samoin kuin ensimmäinenkin, mutta liittämisen jälkeen lankaa vedetään kapillaarin sisään, jolloin lanka katkeaa. Tämän jälkeen voidaan siirtyä taas ensimmäiseen vaiheeseen. [28, luku 1]

Lankaliittämisessä käytettiin puoliautomaattista Westbond 454647E -lankaliitoslaitetta. Sekä ensimmäiseen että toiseen liitokseen liittyy omat parametrinsa, joista esimerkiksi seuraavia voidaan säätää työssä käytetyllä laitteella [29, s. 79–83]:

- **Ultraääniteho:** Tämä parametri ilmaisee sen tehon, jolla lankaa hierotaan liitoskohtaa vasten ultraäänitaajudella. Parametria voidaan säätää välillä 0–999. Minimiarvo 0 tarkoittaa, ettei ultraäänitehoa ole. Maksimiarvo 999 vastaa joko 2:n tai 4,5 watin tehoa riippuen siitä, mihin asentoon kytkin on lankaliitoslaitteen ultraääniteholähteessä asetettu.
- **Ultraääniaika:** Tällä parametrilla voidaan asettaa aika, jonka ajan lankaa hierotaan liitoskohtaa vasten. Aikaa voidaan säätää välillä 0–999 ms.
- **Voima:** Tämä parametri määrittää voiman, jolla lankaa painetaan liitoskohtaa vasten. Tällä parametrilla on vain kaksi asetusta: suuri tai pieni. Tämän asetuksen säätö oli kuitenkin työssä käytetyllä laitteella epäkunnossa.
- **Liitoksen syvyys:** Tämä parametri kertoo, kuinka monta pystysuuntaista askelta moottori liikkuu alaspäin sen jälkeen, kun lanka on osunut liitoskohtaan.
- **Nopeus:** Parametri määrittää nopeuden, jolla kapillaaria viedään kohti liitoskohtaa. Arvoa voidaan säätää 0:n ja 5:n välillä, jossa 0 on nopein ja 5 hitain.
- **Viive ennen liitosta:** Tällä parametrilla säädetään sitä aikaa, joka kuluu langan liitoskohtaan osumisesta siihen, että ultraäänihitsaus alkaa. Viivettä voidaan säätää välillä 0–25 ms.

Lisäksi voidaan muuttaa näytealustan lämpötilaa. Tyypillisesti sen lämpötila on 150 °C.

## 5. LANKALIITOSTESTIT JA TULOKSET

Tässä luvussa käsitellään eristekalvon sisältävän elektrodin rakenteen kehitystyötä, rakenteen lankaliitoskestävyydessä ilmenneitä ongelmia ja saatuja lankaliitostestien tuloksia. Luvun alussa tutustutaan siihen, mitä haasteita fotodiodin lankaliittämiseen liittyy. Tämän jälkeen tarkastellaan liittämisen kehitystyötä eri kehityskohteineen ja ilmenneine ongelmineen. Lopuksi esitellään lankaliitostestituloksia.

### 5.1 Haasteet anodikontaktin lankaliittämisessä

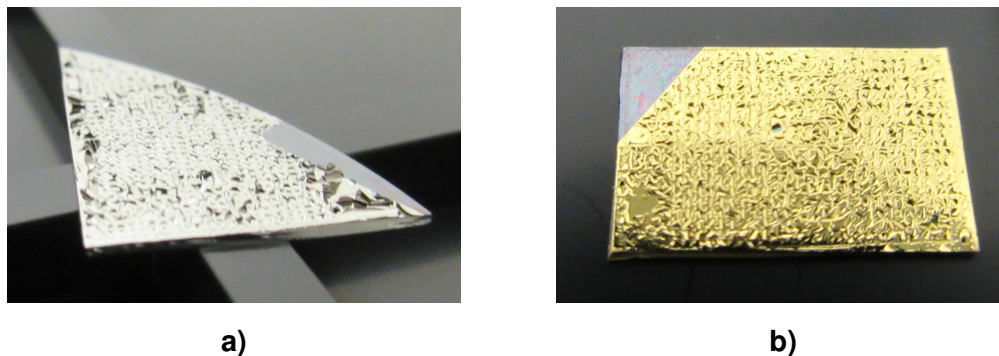
Fotodiodin anodikontaktin lankaliittämistä vaikeuttaa liitoskohdan alla oleva eristerakenne, joka sisältää BCB-eristekalvon. BCB on varsin joustava materiaali: sen kimmokerroin on vain noin 3 GPa lämpökäsittelystä riippuen [17], kun taas esimerkiksi piidioksidin kimmokerroin on yli 60 GPa [30]. Joustava eriste voi vaikeuttaa anodikontaktin lankaliittämistä, sillä jos metallirakenne ei ole riittävän kestävä, se voi hajota eristeen jousaessa.

Metallirakenteen kestävyuden ohella liittämistä vaikeuttavat kontaktin liitoskohdan mitat. Liitoskohta on kooltaan hyvin pieni (noin  $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ ) muun muassa kapasitanssin minimoimisen vuoksi. On havaittu kokeellisesti, että jos liitoskohta on suurempi, suurempi osa liitosyrityksistä pehmeän materiaalin päälle onnistuu [31] (katso [28, luku 9.2]). Lisäksi pienet mitat voivat olla ongelmallisia siksi, että ne vaikeuttavat kultalangan kohdistamista liitoskohtaan.

### 5.2 Kehitystyö

Lankaliittämisen kestävästi rakenteen kehittämiseksi valmistettiin näytteitä, jotka sisältävät fotodiodin anodikontaktia vastaavia rakenteita. Valmistuksen jälkeen näytteitä yritettiin liittää lankaliitoksiin, minkä jälkeen mahdollisesti epäonnistuneita liitoksia analysoitiin. Rakenteista etsittiin kehityskohteita, joita pyrittiin toteuttamaan seuraavissa näytteissä.

Kaikkien näytteiden rakenne on suurilta osin yhtäläinen: substraatin päällä on eristerakenne, jonka päällä on metallirakenne. Eristerakenne sisältää 25 nm paksun piidioksidikerroksen, sen päällä olevan noin  $2 \mu\text{m}$  paksun BCB-polymeerieristekalvon ja sen päällä olevan 230 nm paksun piidioksidikerroksen. Päälimmäiseksi rakenteessa jää metallirakenne, joka oli erilainen kussakin näytteessä.



**Kuva 5.1. a)** Näyte S2. Paksun titaanikerroksen höyrystys keskeytettiin voimakkaan kuoriutumisen vuoksi. **b)** Näyte S3. Kuoriutuminen huomattiin höyrystyksen aikana, mutta höyrystystä päätettiin kuitenkin jatkaa.

Lankaliitoskestävyyttä yritettiin parantaa kolmella eri tapaa: vahvistamalla liitoskohdan metallirakennetta, parantamalla tiettyjen kerrosten välistä adheesiota ja säätämällä lankaliitoslaitteen parametreja. Kehitystyötä käsitellään seuraavaksi kehityskohteittain.

## Metallirakenteen valinta

Tärkein kehityskohde oli vahvistaa eristerakenteen päällä olevaa metallirakennetta. Eräänä ratkaisuna helpottaa lankaliittämistä on jäykistää metallirakennetta tekemällä paksuhko titaani-, nikkeli- tai kromikerros osaksi metallointia. Nimenomaan näiden metallien käyttö vahvikkeina perustuu niiden kovuuksiin ja korkeisiin myötölujuuksiin, joiden on havaittu olevan yhteydessä liitoskohdan kestävyteen. [28, luku 9.2]

Varsin tyypillistä anodikontaktin metallirakennetta ORC:llä valmistetuissa laitteissa vastaa rakenne Ti/Pt/Au 43/43/217 nm, joka höyrystettiin yhteen työn näytteeseen (S1). Tällä näytteellä suurin osa liitosyrityksistä epäonnistui liitoskohdan murtumisen vuoksi. Seuraavassa näytteessä (S2) tarkoitus oli kokeilla liitoskohdan vahvikkeena tavallista paksumpaa 500 nm:n titaanikerrosta, joka voidaan tehdä höyrystämällä.

Titaanin höyrystyksen aikana kuitenkin huomattiin metallin alkaneen kupruilla ja kuoriutua valoresistin päällä olevalta alueelta, kuten kuvassa 5.1 on esitetty. Metallointi jouduttiin keskeyttämään, sillä kuoriutunut metalli voi varjostaa näytettä ja estää liitoskohtien metalloinnin. Lisäksi vaarana oli metallointilaitteen kontaminaatio. Sama ilmiö huomattiin myös ohuemman titaanikerroksen (100 nm) höyrystyksen yhteydessä, mutta höyrystystä päätettiin tästä huolimatta jatkaa. Tällaisen kuoriutumisen arvellaan johtuvan metallin höyrystyksen aikana muodostuvasta puristusjännityksestä, jota käsitellään esimerkiksi lähteessä [32].

Ongelmat höyrystämässä estivät 500 nm paksun titaanikerroksen käytön, mutta ohuempaa 100 nm:n kerrosta kokeiltiin useassa eri näytteessä. Titaanin höyrystystä tarkkailtiin ja tauotettiin, jolloin kuoriutumista ei välttämättä esiintynyt tai sitä pystyttiin vähentämään.

**Taulukko 5.1.** *Kemiallisen nikkelöintikylvyn olosuhteet.*

Lämpötila	94–95 °C
Aika	7 min
Liuoksen määrä	noin 50 ml
Saavutettu paksuus	noin 1,9 µm

Kuitenkaan 100 nm:n titaanikerros riittänyt vahvistamaan liitoskohtaa riittävästi, ja liitettävyyks oli samaa luokkaa kuin tyypillisellä metallirakenteella. Titaania ei siis voitu käyttää liitoskohdan vahvistamiseen.

Toinen mahdollinen ratkaisu olisi käyttää titaanin asemesta esimerkiksi nikkeliä vahvistamaan liitoskohtaa. Nikkeli ei kuitenkaan ole yhtä kovaa kuin titaani. Lisäksi nikkelin myötölujuus on titaania pienempi. Näiden seikkojen takia nikkelikerroksen tulisi olla merkittävästi paksumpi kuin titaanikerroksen [28, luku 9.2], jolloin nikkelin höyrystäminen ei olisi käytännöllistä esimerkiksi siihen kuluvaan pitkään aikaan. Kerroksen tekemiseen päätettiin kokeilla kemiallista nikkelöintiä.

Kemiallisesti kerrostettavan nikkelin alle höyrystettiin Ti/Pt/Au/Ni 50/50/100/50 nm alusmetalleiksi. Nikkelikerroksen tavoitepaksuus oli noin 2 µm, mutta ensimmäiseen näytteen (S7) kerrospaksuutta tuli noin 3,5 µm, sillä nikkelöintikylvyn parametrit eivät olleet tarkkaan tiedossa. Tällä näytteellä päällimmäiseksi höyrystettiin kultaa, mutta se ei pysynyt kiinni nikkelissä. Toisaalta nikkelikerros vaikutti vahvistavan liitoskohtaa varsin hyvin.

Toisessa näytteessä (S8) nikkelikylvyn parametreja oli optimoitu. Nämä hyväksi havaitut parametrit on esitetty taulukossa 5.1 ja niillä päästiin hyvin lähelle 2 µm:n tavoitepaksuutta. Nikkelin päälle höyrystettiin tällä kertaa metallit Ti/Pt/Au 50/50/200 nm. Titaani tarttui hyvin nikkelisiin, ja tällä näytteellä saatiinkin erittäin hyvä liitossaanto.

Kemiallisen nikkelöinnin jälkeen resisti ja ylimääräinen nikkeli tuli poistaa lift-off-menetelmällä. Tämä osoittautui kuitenkin haastavaksi vaiheeksi, sillä näytettä jouduttiin kylvetämään tavallista pidempään S1165-liuotuksessa, jotta metalli irtoaisi. Kun metalli lopulta saatiin irtoamaan, se irtosi melko yhtenäisenä metalliliuskana koko näytteen metalloidulta alueelta. Usein tämä tapahtui joko näytteen huuhtelun tai kuivaamisen yhteydessä.

Syynä ongelmiin voi olla esimerkiksi nikkelikerroksen suuri paksuus resistikerroksen paksuuteen nähden. Toinen vaihetta vaikeuttava seikka on se, että höyrystämistä vastoin nestekylvyssä tapahtuva kemiallinen pinnoitus on suuntaamaton. Nikkelöinnissä metallia voi siis pinnoittua kaikkensuuntaisille pinnoille, mukaan lukien resistin lähes pystysuorille seinämille resistin alileikkautuneesta profiilista huolimatta. Kumpikin näistä seikoista voi vaikeuttaa merkittävästi liuoksen tunkeutumista nikkelin alle liuottamaan resistiä. Lift-off-vaihe lopulta kaikissa tapauksissa onnistui näistä vaikeuksista huolimatta. On kuitenkin huomioitava, että liuotinkylvyn pitkä kesto voi olla ongelma varsinaisen fotodiodin val-

**Taulukko 5.2.** PECVD:llä tehdyn piidioksidin ja BCB:n adheesion parantamiseksi tehdyn typpi-plasmakäsittelyn parametrit.

N <sub>2</sub> -virtaus	100 sccm
RF-teho	180 W
Paine	500 mTorr
Lämpötila	300 °C
Aika	2 min / 6 min

mistusprosessissa, koska sillä voi olla ei-toivottuja vaikutuksia muihin laitteen kerroksiin. Liuotin voisi esimerkiksi liuottaa jotakin tarpeellista kerrosta.

## Eristekalvon ja piidioksidin adheesion parantaminen

Toinen kehitettävä kohde näytteissä oli BCB:n ja sen päällä olevan 230 nm paksun piidioksidikerroksen välinen heikko adheesio. Näiden kerrosten välisessä tarttuvuudessa havaittiin ongelmia lähes kaikissa näytteissä. Ongelman pääteltiin olevan nimenomaan näiden kerrosten välillä profilometrimittauksilla.

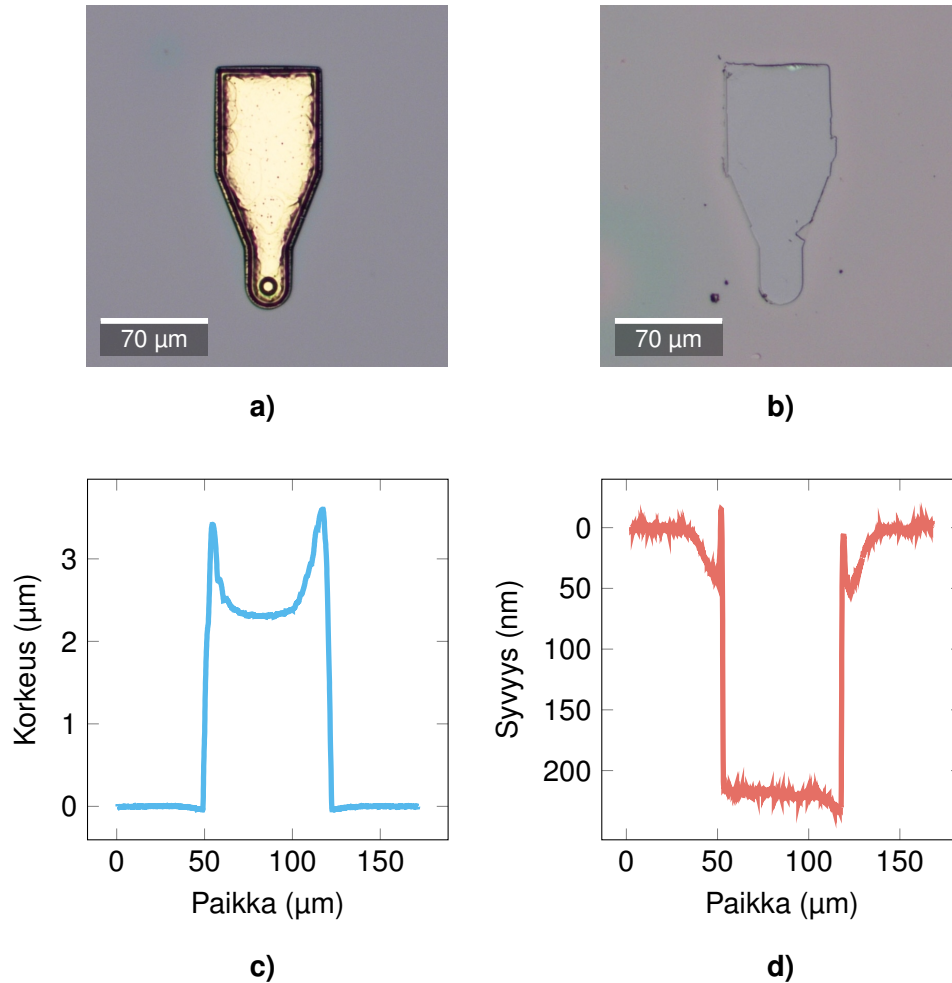
Kuvassa 5.2 on esitetty esimerkkinä ehjän ja irronneen liitoskohdan mikroskooppikuvat yläpuolelta ja profilometrimittaukset liitoskohdan yli. Profilometrillä saadun syvyysprofiilin perusteella vaikuttaa siltä, että BCB:n päällä oleva piidioksidikerros on irronnut kokonaisuudessaan liitoskohdan metallien mukana. Vastaava profilometrimittaus tehtiin usealle eri liitoskohdalle eri näytteissä, ja tulokset olivat hyvin samankaltaisia.

Tähän ongelmaan ratkaisuksi kokeiltiin piidioksidin kasvatusta edeltävää *in situ* -typpi-plasmakäsittelyä PECVD-laitteen kammiossa. Plasmakäsittelyn arvellaan poistavan BCB:n pinnalta oksidikerroksen ja muodostavan pintaan piidioksidiin sitoutuvia amiineja, minkä havaittiin eräässä tutkimuksessa parantaneen näiden kerrosten välistä tarttuvuutta merkittävästi [33].

Plasmakäsittelyä kokeiltiin 180 W:n teholla kahdella eri ajalla. Lyhyemmän, 2 minuutin plasmakäsittelyn havaittiin parantavan liitossaantoa hieman verrattuna sellaiseen näytteeseen, jolle käsittelyä ei tehty. Tätä vastoin 6 minuuttia kestänyt plasmakäsittely ei parantanut liitossaantoa. Tarkemmat plasmakäsittelyn parametrit on esitetty taulukossa 5.2.

## Liitosparametrien säätö

Näytteen rakenteen lisäksi myös lankaliittämistä voi optimoida lankaliitoslaitteen parametrien avulla. Suurin oletusparametreihin tehty muutos oli näytealustan lämpötilan laskeminen 150 °C:sta 50 °C:een. Perusteena tähän oli BCB:n jäykistäminen. Muilla parametri-muutoksilla yritettiin kompensoida lämpötilan laskun vaikutusta sekä pehmentää liittämistä.



**Kuva 5.2. a) ja c)** Ehjän liitoskohdan mikroskooppikuva ja profilometrimittaus. Liitoskohdan paksuus on tässä tapauksessa noin 2,3 µm. **b) ja d)** Irronneen liitoskohdan mikroskooppikuva ja profilometrimittaus. Syvyysprofiili viittaa siihen, että päällimmäisin piidioksidikerros on revennyt liitoskohdan mukana. Kuvat ovat näytteestä S8.

tä.

Eristekalvon päällä olevien liitoskohtien lankaliittämiseen käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 5.3. Taulukossa on esitetty sulkeissa myös laitteen oletusparametrit, joita ei tässä työssä voitu käyttää. Parametrien säädössä keskityttiin enemmän toiseen liitokseen liittyviin parametreihin, sillä toisen liitoksen pysyvyyden havaittiin olevan parempi kuin ensimmäisen. Ensimmäisen liitoksen parametrit eivät siis ole taulukossa yhtä optimaaliset kuin toisen.

Alhaisemmassa lämpötilassa tapahtuva liittäminen vaatii enemmän ultraäänienergiaa, jota säädettiin ultraääniajan ja -tehon avulla. Toisaalta aikaa tai tehoa saatettiin myös laskea liitoksen pehmentämiseksi. Erityisesti ensimmäisen liitoksen tekeminen vaikutti liian rajulta, jolloin sen energiaa päädyttiin laskemaan.

Molempien liitosten kohdalla nopeus laskettiin hitaimpaan mahdolliseen arvoon, jotta lii-

**Taulukko 5.3.** Eristekalvon päällä olevien liitoskohtien lankaliittämisessä käytetyt parametrit. Oletusparametrit on kirjoitettu kursivilla sulkeisiin.

	1. liitos		2. liitos	
Lämpötila (°C)	50	(150)	50	(150)
Teho	350	(300)	400	(350)
Aika (ms)	23	(30)	30	(30)
Voima	suuri	(suuri)	suuri	(suuri)
Syvyys	4	(2)	2	(2)
Nopeus	5	(4)	5	(4)
Viive (ms)	5	(7)	5	(6)

toksen tekeminen olisi mahdollisimman pehmeä. Voimaa ei tässä tapauksessa voitu säätää, sillä sen säätö oli epäkunnossa.

Parametreissa on vielä kehitettävää. Esimerkiksi viiveen lisääminen voi antaa lisää aikaa eristekalvon joustamisen vakautumiselle, mikä voi parantaa liitoksen onnistumisen mahdollisuutta [28, luku 9.2]. Mahdollisuuksien mukaan myös ohuemman kultalangan käyttöä ja palloliitoksessa pienemmän pallon tekemistä langan päähän voisi harkita, sillä ne voisivat mahdollistaa hellempien liitosparametrien käytön [28, luku 9.2].

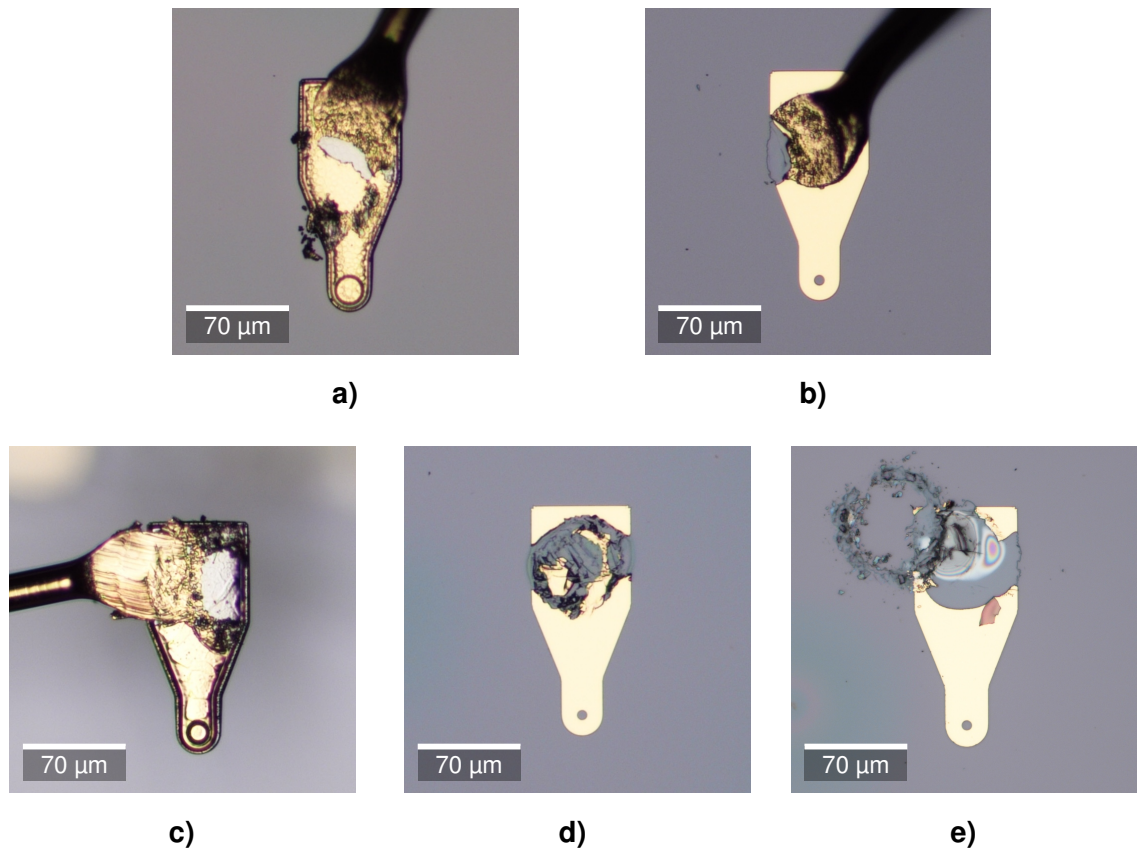
### 5.3 Liitostestien tulokset

Liitostestitulosten analyysia varten liitosyritykset jaettiin kolmeen eri luokkaan, joista on esitetty joitakin esimerkkejä mikroskooppikuvina kuvassa 5.3. Kuvissa a) ja b) on esitetty tyypillisiä testin kannalta onnistuneiksi katsottuja liitoksia. Niissä kultalanka on jäänyt kiinni liitoskohtaan. Näissäkin toki on joitakin puutteita, kuten kuvassa a) metallin kuoriutumista ja kuvassa b) liitoskohdan pieni murtuma.

Kuvassa 5.3 c) esitetään tyypillinen parhaiden näytteiden epäonnistunut liitosyritys, jossa kultalanka kiinnittyy liitoskohtaan, mutta liitoskohta nousee ehjänä pois liitoskohdasta. Tällainen lopputulos oli varsin yleinen viimeisissä näytteissä. Sen katsottiin lisäksi kuvaavan jollakin tavalla liitoskohdan vahvuutta, sillä liitoskohdan metallirakenteen kestävyys ei katsottu olleen syynä tämänkaltaisiin epäonnistuneisiin liitosyrityksiin.

Kuvissa 5.3 d) ja e) esitetään tyypillisiä liitoskohdan murtumia, jotka johtivat epäonnistuneeseen liitosyritykseen. Tämänkaltaiset epäonnistuneet liitosyritykset olivat hyvin yleisiä työn eri näytteissä viimeisimpiä lukuun ottamatta.

Näytteiden lankaliitostestien tulokset esitetty taulukossa 5.4. Näissä testeissä näytteiden liitoskohtiin yritettiin tehdä palloliitosmenetelmän toisia liitoksia. Testissä käytetyt toisen liitoksen parametrit on esitetty taulukossa 5.3. Ensimmäinen liitos tehtiin alustalle. Tä-

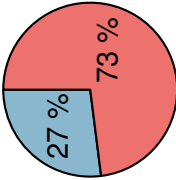
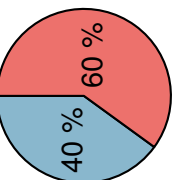
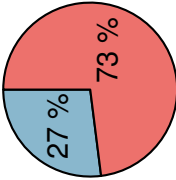
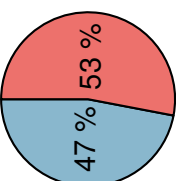
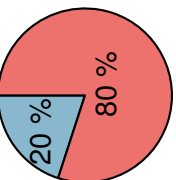
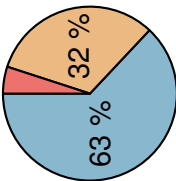
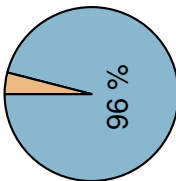


**Kuva 5.3.** Esimerkkejä liitosyritysten lopputuloksista. **a)** Kiinni jäänyt kultalanka nikkelillä vahvistetun liitoskohdan päällä (S8). **b)** Kiinni jäänyt kultalanka ohuen liitoskohdan päällä (S4). **c)** Ehjänä näytteeltä irronnut liitoskohta (S7). **d)** Tyypillinen murtunut liitoskohta (S4). **e)** Tyypillinen murtunut liitoskohta (S4).


mä työ käsittää kaikkiaan kahdeksan näytettä, joista seitsemälle on tehty lankaliitostestit. Yhden näytteen valmistaminen epäonnistui titaanin höyrytämisen yhteydessä.


Titaanivahvikekerroksen sisältävistä näytteistä paras liitossaanto oli 27 % ilman typpi-plasmakäsittelyä ja 47 % typpi-plasmakäsittelyllä. Nikkelivahvikekerroksen sisältävistä näytteistä parhaalla saavutettiin 96 %:n liitossaanto. Lyhyemmän, 2 minuutin typpi-plasmakäsittelyn havaittiin parantaneen liitossaantoa käsittelemättömään tapaukseen nähden. Tuloksia arvioidessa tulee huomioida, tässä työssä on testattu ainoastaan pysyvyyttä eikä niinkään liitoksen laatua.

**Taulukko 5.4.** Lankaliitostestien tulokset. Testeissä eri näytteiden liitoskohtien päälle on yritetty tehdä palloliitosmenetelmän toisia liitoksia.

Näyte	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Tulokset (2. liitos)		Näytteen valmistus epäonnistui.						
Liitosyritysten lukumäärä	15	15	15	15	15	15	15	26
Liitoskohdan metallirakenne (nm)	Ti/Pt/Au 43/43/217	Ti/Pt/Au 500/30/300	Ti/Pt/Au 43/43/217	Ti/Pt/Au 100/43/217	Ti/Pt/Au 100/43/217	Ti/Pt/Au 100/43/217	Ti/Pt/Au/Ni 50/50/100/50 EN/Au 3550/200	Ti/Pt/Au/Ni 50/50/100/50 EN/Ti/Pt/Au 1900/50/50/200
BCB:n tyyppi- plasma- käsittely	ei	ei	2 min	2 min	2 min	6 min	2 min	2 min

 Liitoskohta murtui.

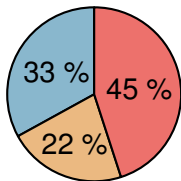
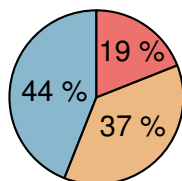
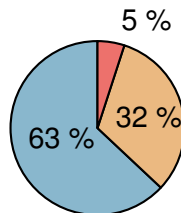
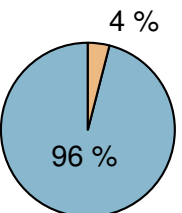
 Liitoskohta irtosi kokonaan näytteestä.

 Kultalanka jäi onnistuneesti kiinni liitoskohtaansa.

Parhaiten liitostesteissä menestyneiden näytteiden S7 ja S8 tarkempia tuloksia on esitetty taulukossa 5.5. Siinä on esitetty sekä ensimmäisten että toisten liitosten tulokset. Vaikka näytteessä S7 oli paksumpi nikkelikerroks, sillä oli suhteellisesti enemmän murtuneita liitoskohtia kuin näytteellä S8. Tätä selittää pääasiassa näytteestä S7 puuttuva titaaniadheesiokerros kemiallisesti pinnoitetun nikkelin päältä.

Lisäksi kummallakin näytteellä ensimmäisellä liitoksella saavutettiin huonompi pysyvyys kuin toisella. Tämän arvellaan johtuvan siitä, että ensimmäisen liitoksen jälkeinen veto on suurempi kuin toisen. On myös mahdollista, että se johtuu riittämättömästi säädetyistä ensimmäisen liitoksen liitosparametreista.

**Taulukko 5.5.** Parhaiten lankaliitostesteissä menestyneiden näytteiden tulokset. Tässä on esitetty myös ensimmäisen liitoksen tulokset.

Näyte	S7	S8
Tulokset (1. liitos)		
Liitosyritysten lukumäärä	18	16
Tulokset (2. liitos)		
Liitosyritysten lukumäärä	19	26

- Liitoskohta murtui.
- Liitoskohta irtosi kokonaan näytteestä.
- Kultalanka jäi onnistuneesti kiinni liitoskohtaan.

## 6. YHTEENVETO

Kandidaatintyön teoriaosa käsitteli sähköeristeiden teoriaa. Eristeiden määritelmään tutustuttiin energiavyöteorian avulla, minkä jälkeen keskityttiin eristeiden dielektrisiin ominaisuuksiin. Tämän työn kannalta oleellimmat ominaisuudet ovat suhteellinen permittiivisyys ja dielektriset häviöt, jotka liittyvät aineen polarisaatioon ja siinä syntyviin energiahäviöihin.

Fotodiodin eristekalvon dielektriset ominaisuudet ovat hyvin tärkeitä laitteen taajuuskäytännön kannalta. BCB-eristekalvon pieni suhteellinen permittiivisyys ja matalat häviöt mahdollistavat osaltaan mahdollisimman suuren fotodiodin toimintataajuuden. BCB-eristekalvon käyttöön liittyy kuitenkin käytännön ongelma, sillä se on joustava. Tällöin sen päällä olevan anodikontaktin lankaliittäminen voi olla vaikeaa.

Tämän työn kokeellisessa osassa kehitettiin valmistusprosessi eristekalvon päällä olevalle liitoskohdalle. Suurimpana haasteena oli tehdä elektrodin liitoskohdasta tarpeeksi kestävä, jotta se kestää lankaliittämisen. Erilaisia liitoskohtarakenteita valmistettiin puhdas-tilassa, minkä jälkeen niitä testattiin lankaliittämällä. Näytteistä tarkasteltiin, kuinka suuri osuus liitoksista onnistui. Onnistuneeksi liitokseksi katsottiin silmämääräisesti mikroskooppilla liitoskohdassa pysynyt kultalanka.

Tavanomaiset liitoskohdan rakenteet olivat liian heikkoja kestääkseen lankaliittämistä, ja ne murtuivat liittämistä yritettäessä. Rakennetta yritettiin vahvistaa titaanikerroksella, mutta riittävän paksua titaanikerrosta ei onnistuttu tekemään höyrystyksessä ilmenneen metallin kuoriutumisen takia. Lopulta vahvikekerroksena käytettiin kemiallisesti pinnoitettua nikkeli-kerrosta, jonka sisältävät liitoskohdat osoittautuivat erinomaisen kestäviksi. Saavutetut tulokset ovat johdonmukaisia kirjallisuuden kanssa, jossa myös on käytetty vastaavia rakenteita liitoskohdan vahvistamiseksi. Työn lopputuloksia arvioidessa tulee kuitenkin huomioida se, että työssä on arvioitu liitoksen pysyvyyttä ainoastaan silmämääräisesti eikä liitosten vahvuutta ole testattu.

Vaikka nikkelöinnin katsottiin ratkaiseen liitoskohdan metallirakenteen vahvuuteen liittyneen ongelman, liitoskohdan rakenteessa on edelleen BCB:n ja päällimmäisen piidioksidikerroksen välillä oleva adheesio-ongelma. Ongelman olemassaolo näiden kerrosten välillä todettiin profilometrimittauksilla, ja sitä yritettiin ratkoa BCB:n typpi-plasmakäsittelyllä ennen piidioksidin kasvattamista. Työn lyhyemmän plasmakäsittelyn arvellaan paranta-

neen adheesiota hieman, joskin heikko adheesio näkyi parhaissakin näytteissä erityisesti lankaliitoksen ensimmäisestä liitosta yritettäessä.

Liitossaantoa yritettiin parantaa myös optimoimalla lankaliitoslaitteen parametreja. Tärkein muutos oletusparametreihin nähden on matalamman lämpötilan käyttö, johon perusteena oli eristekalvon jäykistäminen. Liitosparametrien optimoinnissa keskityttiin palloliitosmenetelmän toisen liitoksen parametrien optimointiin. Myös ensimmäisen liitoksen parametreja säädettiin, mutta lopulta palloliitosmenetelmän toisella liitoksella saavutettiin merkittävästi parempi liitossaanto.

Merkittävä ongelma kemiallisen nikkeloinnin käyttämisessä on sen huono yhteensopiavuus lift-off-vaiheen kanssa. Lift-off-vaiheen pitkittynyt liuotinkylpy voi olla ongelma fotodiodin valmistuksessa, jos liuotin esimerkiksi alkaisi liuottaa muita tarpeellisia kerroksia. Yleinen ongelma kemialliseen nikkelointiin liittyen on lopullisessa rakenteessa käytettyjen eri metallikerrosten suuri lukumäärä, mikä voi altistaa lisäongelmille, kuten kerrosten hapettumiselle tai virheen mahdollisuudelle laitteen valmistuksessa.

## LÄHTEET

- [1] Tadao Nagatsuma et al. "Continuous-wave terahertz spectroscopy system based on photodiodes". *Piers Online* 6.4 (2010), s. 390–394. DOI: 10.2529/piers091029132808.
- [2] Gintaras Valušis et al. "Roadmap of terahertz imaging 2021". *Sensors* 21.12 (2021), s. 4092. DOI: 10.3390/s21124092.
- [3] Mira Naftaly et al. "Metrology state-of-the-art and challenges in broadband phase-sensitive terahertz measurements". *Proceedings of the IEEE* 105.6 (2017), s. 1151–1165. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2644108.
- [4] Tadao Nagatsuma, Guillaume Ducournau ja Cyril C. Renaud. "Advances in terahertz communications accelerated by photonics". *Nature Photonics* 10.6 (2016), s. 371–379. DOI: 10.1038/nphoton.2016.65.
- [5] Tadao Ishibashi et al. "Unitraveling-Carrier Photodiodes for Terahertz Applications". *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 20.6 (2014), s. 79–88. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2336537.
- [6] Ben G. Streetman ja Sanjay Kumar Banerjee. *Solid state electronic devices*. eng. Seventh edition. Boston: Pearson, 2016. ISBN: 978-1-292-06076-7.
- [7] Gorur G. Raju. *Dielectrics in electric fields*. eng. 2. painos. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN: 978-1-4987-6521-3.
- [8] Safa O. Kasap. *Principles of electronic materials and devices*. eng. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2006. ISBN: 0-07-295791-3.
- [9] Kaarle Kurki-Suonio ja Riitta Kurki-Suonio. *Vuorovaikutuksista kenttiin*. 3. painos. Limes ry, 1993.
- [10] Stephen J. Havriliak ja Shinichi Negami. "A complex plane representation of dielectric and mechanical relaxation processes in some polymers". eng. *Polymer (Guilford)* 8.C (1967), s. 161–210. ISSN: 0032-3861. DOI: 10.1016/0032-3861(67)90021-3.
- [11] Tadao Ishibashi et al. "Uni-Traveling-Carrier Photodiodes". Teoksessa: *Ultrafast Electronics and Optoelectronics*. Optica Publishing Group, 1997, UC3. DOI: 10.1364/UEO.1997.UC3. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=UEO-1997-UC3>.
- [12] Thomas P. Pearsall. *Photonics essentials*. eng. 1. painos. McGraw-Hill professional engineering. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN: 1-281-78485-0.
- [13] Senjuti Khanra, Ipsita Sengupta ja Abhirup Das Barman. "Small and large signal analysis using circuit model of InGaAs/InP based uni-travel carrier photodiode". *Optical and Quantum Electronics* 49 (2017), s. 1–24. DOI: 10.1007/s11082-017-1205-2.

- [14] Steven J. Spector et al. "Integrated optical components in silicon for high speed analog-to-digital conversion". eng. Teoksessa: *Proceedings of SPIE*. Vol. 6477. 1. Bellingham, Wash: SPIE, 2007, 64770O-64770O-14. ISBN: 9780819465900. DOI: 10.1117/12.705219.
- [15] Denis Shamiryán et al. "Low-k dielectric materials". *Materials today* 7.1 (2004), s. 34–39. DOI: 10.1016/S1369-7021(04)00053-7.
- [16] Paul A. Kohl. "Low-Dielectric Constant Insulators for Future Integrated Circuits and Packages". eng. *Annual review of chemical and biomolecular engineering* 2.1 (2011), s. 379–401. ISSN: 1947-5438. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114137.
- [17] Dow Chemical Company. *Processing Procedures for CYCLOTENE 3000 Series Resins*. Huhtikuu 2008. URL: [https://kayakuam.com/wp-content/uploads/2019/10/cyclotene\\_3000\\_dry\\_etch.pdf](https://kayakuam.com/wp-content/uploads/2019/10/cyclotene_3000_dry_etch.pdf).
- [18] Alireza Modafe et al. "Electrical characterization of benzocyclobutene polymers for electric micromachines". *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 4.3 (2004), s. 495–508. DOI: 10.1109/TDMR.2004.830289.
- [19] David Burdeaux et al. "Benzocyclobutene (BCB) dielectrics for the fabrication of high density, thin film multichip modules". *Journal of Electronic Materials* 19 (1990), s. 1357–1366. DOI: 10.1007/BF02662825.
- [20] Sergei E. Alexandrov ja Michael L. Hitchman. "Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition Processes". Teoksessa: *Chemical Vapour Deposition - Precursors, Processes and Applications*. Toim. Anthony C. Jones ja Michael L. Hitchman. Royal Society of Chemistry (RSC), 2009. Luku 12. ISBN: 978-0-85404-465-8.
- [21] Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss ja Preston J. Renstrom. "Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers". eng. *Applied physics letters* 67.21 (1995), s. 3114–3116. ISSN: 0003-6951. DOI: 10.1063/1.114851.
- [22] Christophe Vieu et al. "Electron beam lithography: resolution limits and applications". *Applied surface science* 164.1-4 (2000), s. 111–117. DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00352-4.
- [23] Mordechai Schlesinger ja Milan Paunovic. *Modern Electroplating: Fifth Edition*. eng. 5th ed. Vol. 52. The ECS series of texts and monographs. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2011. ISBN: 0470167785.
- [24] Merck KGaA. *Electroless nickel plating solution*. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/Fl/en/product/aldrich/901655>.
- [25] D. J. Pedder. "Flip Chip Solder Bonding for Microelectronic Applications". eng. *Microelectronics international* 5.1 (1988), s. 4–7. ISSN: 1356-5362. DOI: 10.1108/eb044301.
- [26] John H. Lau, Stephen J. Erasmus ja Donald W. Rice. "Overview of Tape Automated Bonding Technology". eng. *Circuit World* 16.2 (1990), s. 5–24. ISSN: 0305-6120. DOI: 10.1108/eb044017.

- [27] Philip Garrou. "Wafer level chip scale packaging (WL-CSP): An overview". *IEEE Transactions on Advanced Packaging* 23.2 (2000), s. 198–205. DOI: 10.1109/6040.846634.
- [28] George G. Harman. *Wire Bonding in Microelectronics*. eng. 3. painos. McGraw-Hill's AccessEngineering. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN: 1-282-50490-8.
- [29] *Westbond Model 454647E Series Instruction Manual*. Westbond Inc. 2012.
- [30] Giovanni Carlotti, L. Doucet ja M. Dupeux. "Elastic properties of silicon dioxide films deposited by chemical vapour deposition from tetraethylorthosilicate". *Thin Solid Films* 296.1-2 (1997), s. 102–105. DOI: 10.1016/S0040-6090(96)09346-7.
- [31] Kazuya Takeda et al. "Ultrasonic Wirebonding Using Gold Plated Copper Wire onto Flexible Printed Circuit Board". Teoksessa: *Proceedings of the international microelectronics conference*. 1994, s. 173–177.
- [32] Grégory Abadias et al. "Review Article: Stress in Thin Films and Coatings: Current Status". *Challenges, and Prospects* (2018). DOI: 10.1116/1.5011790.
- [33] E. O. Shaffer et al. "A method for improving the adhesion of PE-CVD SiO<sub>2</sub> to Cyclo-tene 5021 polymeric interlayer dielectric". eng. Teoksessa: *Proceedings of the IEEE 1998 International Interconnect Technology Conference*. Vol. 1998. 1998, s. 223–225. ISBN: 0780342852. DOI: 10.1109/IITC.1998.704905.