

Jasmin Kuusisto

CMOS-TEKNIIKKAA HYÖDYNTÄVÄT KAPASITIIVISET SORMENJÄLKI- TUNNISTIMET

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Jasmin Kuusisto: CMOS-tekniikkaa hyödyntävät kapasitiiviset sormenjälkitunnistimet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Kapasitiivisia sormenjälkitunnistimia käytetään yleisesti esimerkiksi kuluttajaelektronikassa niiden halvan hinnan, pienen koon ja tehokkuuden takia. Tässä kandidaatintyössä perehdytään kapasitiivisten sormenjälkisensorien rakenteeseen ja toimintaan elektronikan näkökulmasta. Erityisesti halutaan selvittää, millaisia erilaisia vaihtoehtoja anturipiirien rakenteelle on olemassa, ja mitkä ovat näiden rakenteiden edut. Tämän lisäksi perehdytään myös siihen, miten komplementaarista metallioksidipuolijohde-tekniikkaa (CMOS, engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor) voidaan hyödyntää kapasitiivisten sormenjälkisensorien valmistuksessa.

Aluksi tässä työssä esitellään CMOS-piirin perusrakenne ja -toiminta. Samassa yhteydessä perehdytään myös metallioksidipuolijohdekanavatransistoreihin (MOSFET, engl. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), joista CMOS-piiri rakentuu. Näiden jälkeen kerrotaan, miten kapasitiivinen sormenjälkisensori voidaan tuottaa CMOS-sirulle. Työssä havaitaan, että sormenjälkisensori voidaan koostaa elektrodimatriisista, jonka jokaisen solun tunnistuselektrodi tuotetaan CMOS-sirun päälle. Jokainen tunnistuselektrodi muodostaa sormenpään ihon kanssa kondensaattorin, jonka kapasitanssin avulla voidaan kertoa, onko kyseistä elektrodia vasten sormenpään korkeampi vai matalampi ihoalue. Lisäksi havaitaan, että elektrodimatriisin koko vaikuttaa tuotettavan sormenjälkikuvan tarkkuuteen.

CMOS-osuuden jälkeen työssä perehdytään tarkemmin erilaisiin kapasitiivisiin sensoripiireihin ja erityisesti siihen, miten sormenpään aiheuttamat erisuuruiset kapasitanssit voidaan muuttaa jännitteiksi sormenjälkikuvan muodostusta varten. Kirjallisuustutkimus osoittaa, että metallioksidipuolijohdekanavatransistorit ovat oleellinen osa anturipiirin rakennetta. Näitä transistoreja ohjaamalla sensoripiirissä saadaan tuotettua ulostulojännite, joka riippuu sormenpään aiheuttamasta kapasitanssista. Tätä jännitettä voidaan verrata asetettuun referenssijännitteeseen tai viereisen tunnistuselektrodin piirin tuottamaan jännitteeseen. Sormenpään matalat ja korkeat ihoalueet eli harjanne- ja laaksoalueet aiheuttavat erisuuruisen kapasitanssin, minkä takia myös saatu ulostulojännite on näissä kohdissa erisuuri. Digitaalinen sormenjälkikuva saadaan muodostettua näiden erisuuruisten jännitteiden perusteella.

Tässä työssä havaitaan myös, että sensoripiirien erilaisilla rakenteilla ja komponenttivalinnoilla voidaan mitätöidä piirissä esiintyviä loiskapasitansseja. Käytetyillä komponenteilla ja ratkaisuilla voidaan myös parantaa esimerkiksi tunnistimen luotettavuutta sekä tehokkuutta. Näiden asioiden lisäksi työn lopussa pohditaan hieman kapasitiivisten sormenjälkisensorien tulevaisuutta ja niiden käyttöä esimerkiksi älypuhelimissa.

Avainsanat: Kapasitiivinen sormenjälkitunnistin, kapasitiivinen sormenjälkisensori, CMOS-sormenjälkisensori, kapasitiivinen sormenjälkitunnistus, CMOS-sensori, biometrinen tunnistus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

On hienoa, että sain kirjoittaa kandidaatintyöni näin mielenkiintoisesta aiheesta. Kapasitiivisissa sormenjälkitunnistimissa yhdistyy mielestäni moni kiinnostava elektroniikan osa-alue. Lisäksi ne ovat myös oleellinen osa joidenkin älypuhelimien sormenjälkitunnistusta, mikä tekee aiheesta ajankohtaisen.

Haluan kiittää työni ohjaajaa, yliopistonlehtori Erja Sipilää, hyvistä kommentteista sekä kannustuksesta. Lisäksi haluan kiittää perhettäni, poikaystäväni sekä ystäviäni tuesta ja kannustuksesta.

Tampereella, 22.5.2020

Jasmin Kuusisto

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SORMENJÄLKITUNNISTUKSEN PERUSPERIAATTEET	2
2.1 Sormenjäljen anatomia	2
2.2 Automaattisten sormenjälkitunnistimien toiminta	2
3. CMOS-MIKROPIIRITEKNIikka	5
3.1 Metallioksidipuolijohdekanavatransistorit.....	5
3.2 CMOS-piirin rakenne ja toiminta	7
3.3 CMOS-tekniikka sormenjälkitunnistimen anturipiirissä	9
4. KAPASITIIVISET SORMENJÄLKITUNNISTIMET	12
4.1 Kapasitanssin merkitys anturipiirissä.....	12
4.2 Erilaiset tunnistusmenetelmät: pyyhkäisy- ja kosketustunnistus	15
4.3 Kapasitiivisen sormenjälkisensorin ja anturipiirin rakenne	17
4.4 Analogisen sormenjälkidatan muuttaminen digitaaliseksi sormenjälkikuvaksi	22
5. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET	25

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: nMOS- ja pMOS-kanavatransistorien perusrakenne [5 s.172].....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 2: MOS-kanavatransistorien erilaisia piirrosmerkkejä, mukaillen lähteitä 5 ja 9.....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 3: CMOS-kytkennän rakenne [10]......</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 4: Kapasitiivinen sormenjälkisensori [8].</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 5: Periaatekuva sormenjälkisensorin kapasitansseista [8].....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 6: a) Periaatekuva ja b) MOS-transistoreilla toteutettu kytkentä yhdestä mahdollisesta anturipiiristä [3].</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 7: Yksi mahdollinen anturipiiri, jossa hyödynnetään vahvistinta ja komparaattoria [8].</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 8: Eräs mahdollinen anturipiiri kuudella MOS-transistorilla toteutettuna [14].</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 9: Kuvan 6 b tunnistuspiirin mukaisella sensorilla tuotettu digitaalinen sormenjälkikuva [3].</i>	<i>22</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

1P4M	engl. 1-polysilicon-4-metal, 1-polypii-4-metalli
2P4M	engl. 2-polysilicon-4-metal, 2-polypii-4-metalli
AD	engl. analog-to-digital, analogia-digitaali
CCD	engl. charge-coupled device, CCD-kenno
CMOS	engl. complementary metal oxide semiconductor, komplementaarinen metallioksidi-puolijohde
DPI	engl. dots per inch, pistettä tuumaa kohden
ESD	engl. electrostatic discharge, sähköstaattinen purkaus
IC	engl. integrated circuit, mikropiiri, integroitu piiri
LED	engl. light-emitting diode, hohtodiodi, ledi
MOSFET	engl. metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, metallioksidi-puolijohdekanavatransistori
PPI	engl. pixels per inch, kuvapistettä tuumaa kohden
RF	engl. radio frequency, radiotaajuus
SA	engl. sensing amplifier, anturipiirin vahvistin
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company
UV	engl. ultraviolet, ultravioletti

1. JOHDANTO

Ihmisen sormenjälki on kiinnostava sekä yksilöllisyytensä että pysyvyytensä vuoksi. Jälki pysyy samana koko ihmisen eliniän pienistä haavoista ja hankaumista huolimatta. Vain tarpeeksi syvä vaurio voi pysyvästi estää sormenjäljen ihoa palautumasta takaisin muotoonsa. [1, s. 51 – 52]

Sormenjälkien olemassaolo on tiedostettu jo tuhansia vuosia sitten. Siitä huolimatta järjestelmällisiä menetelmiä jälkien luokitteluun ja tunnistamiseen alettiin kehittää vasta 1800-luvulla. Tutkimusten myötä sormenjälkien yksilöllisyys varmistui ja menetelmät kehittyivät tarpeeksi, jotta niitä voitiin alkaa käyttää rikostutkimuksessa. Alun perin sormenjäljet kerättiin talteen musteen avulla, mutta nykyisin käytössä on erilaisiin tekniikoihin perustuvia automaattisia sensoreita. [2, s. 33 – 36] Sormenjälkiä käytetäänkin nykyään rikostutkimuksen ohella yksilöntunnistukseen. Nykyään suuressa osassa älypuhelimista tunnistautumiseen voidaankin käyttää sormenjälkeä muiden vaihtoehtojen ohella.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään kapasitiivisten sormenjälkisensorien rakenteeseen ja toimintaan. Rakenteeseen perehdytään erityisesti elektroniikan näkökulmasta. Tavoitteena on selvittää, millä eri tavoin kapasitiivisia sormenjälkisensoreita voidaan toteuttaa. Työssä halutaan myös selvittää, miten kanavatransistoreihin perustuvaa CMOS-mikropiiritekniikkaa (engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor, komplementaarinen metallioksidipuolijohde) voidaan hyödyntää osana sensorin havainnointipiiriä.

Tämän kandidaatintyön toisessa luvussa perehdytään ensin sormenjäljen anatomiaan, minkä jälkeen selitetään automaattisten sormenjälkianturien perustoiminta. Tämän jälkeen esitellään lyhyesti myös erilaisiin tekniikoihin perustuvia sormenjälkisensoreita. Kolmannessa luvussa keskitytään kanavatransistoreihin perustuvaan mikropiiritekniikkaan (CMOS), jota voidaan hyödyntää nykyaikaisissa kapasitiivisissa sensoreissa. Itse kapasitiivisiin sensoreihin sekä niiden rakenteeseen ja toimintaan perehdytään neljännessä luvussa. Lopuksi viidennessä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät johdopäätökset.

2. SORMENJÄLKITUNNISTUKSEN PERUSPERIAATTEET

Sormenjälkien olemassaolo on tiedostettu jo tuhansia vuosia. Ensimmäiset sormenjälkiä koskevat tieteelliset tutkimukset julkaistiin 1600-luvulla. Ne eivät kuitenkaan vielä liittyneet sormenjälkitunnistukseen vaan sormenjäljen biologisiin ominaisuuksiin. Ensimmäiset väitteet sormenjälkien yksilöllisyydestä esitettiin 1700-luvulla. Tämän jälkeen useiden tutkimusten ja tekniikan kehityksen seurauksena sormenjälkitunnistusta alettiin lopulta käyttää rikollisten tunnistamiseen. [2, s. 34] Nykyään sormenjälkitunnistusta käytetään rikostutkinnan lisäksi esimerkiksi älypuhelimissa ja tietokoneissa yksilöntunnistukseen.

2.1 Sormenjäljen anatomia

Ihmisen sormenpäiden ihossa on eripaksuisia ihokerroksia. Ihon ylemmän kerroksen, orvaskeden, matalampia kohtia kutsutaan laaksoiksi. Korkeammat kohdat ovat puolestaan harjanteita. [1, s. 51] Alemmassa ihokerroksessa, verinahassa, on monia erilaisia solurakenteita, esimerkiksi verisuonia ja hermoja. Orvaskesi ja siten harjanteiden muoto rakentuu näiden verinahan solurakenteiden pohjalta. [2, s. 33] Harjanne- ja laaksoalueiden vuorottelu muodostaa pyörteisiä kuvioita sormenpään ihoon. Nämä kuviot yhdessä muodostavat sormenjäljen. [1, s. 51]

Sormenjäljet ovat yksilöllisiä jokaiselle ihmiselle [2, s. 33]. Näin ollen edes identtisillä kaksosilla ei ole samanlaisia sormenjälkiä. Sormenpään iholla on myös kyky parantua siten, että sormenjälki pysyy muuttumattomana, mikäli vaurio on kohdistunut orvaskeeseen eikä sitä syvemmälle. [1, s. 52] Sormenjälkiä käytetäänkin yksilöntunnistuksessa juuri niiden pysyvyyden ja yksilöllisyyden takia [2, s. 33].

2.2 Automaattisten sormenjälkitunnistimien toiminta

Alun perin sormenjälkiä talletettiin painamalla musteeseen kastettu sormenpää paperille. Näiden jälkien vertailua tehtiin ihmissilmin ilman minkäänlaista automaatiota. Sen sijaan ensimmäiset automaattiset sormenjälkitunnistimet kehitettiin 1960-luvulla. Nykyään käytössä on useita erilaisia tekniikoita sormenjäljen automaattiseen kuvantamiseen. [2, s. 34 – 36]

Tässä kandidaatintyössä käsitellään kapasitiivisia sormenjälkitunnistimia. Kapasitanssi kuvaa sitä, miten hyvin jokin elementti pystyy varastoimaan sähkövarausta. Kapasitiivisissa tunnistimissa sormenpään harjanteiden ja laaksojen vuorottelu tunnistetaan niiden

aiheuttamien erilaisten kapasitanssien avulla: laaksojen aiheuttama kapasitanssi on harjannealueiden aiheuttamaa kapasitanssia pienempi. Lopulta nämä kapasitanssit muutetaan jännitteiksi tai virroiksi, joita analysoimalla voidaan muodostaa digitaalinen kuva sormenjäljestä. [3]

Muita digitaalisia sormenjälkikuvia tuottavia järjestelmiä (live scan systems) ovat esimerkiksi optiset sormenjälkisensorit, RF- eli radiotaajuussensorit (engl. radio frequency, radiotaajuus), termiset sensorit sekä ultraäänisensorit [2, s. 36 – 39]. Optiset sormenjälkitunnistimet perustuvat sormenpään valaisemiseen. Tällöin sormenpään harjanteet ja laaksot heijastavat niihin osuvaa valoa. Tämän heijastuneen valon avulla sormenjälki saadaan taltioitua esimerkiksi valoherkkää kennoa (engl. CCD, Charge-Coupled Device, CCD-kenno) hyödyntävän kameran avulla. [4] Nykyään käytössä on myös kameroita, joiden valoherkät kennot perustuvat transistoreilla toteutettuun CMOS-tekniikkaan [2, s. 37]. Valonlähteenä voi toimia esimerkiksi valoa loistava diodi eli hohtodiodi (engl. LED, Light-Emitting Diode, hohtodiodi) [4].

Radiotaajuusalue sisältää korkeita taajuuksia. RF-sensorit perustuvat signaaleihin, joiden taajuus on radiotaajuusalueella. Tällainen signaali syötetään sormenpähän, jolloin se kulkee sormenpään läpi aina tunnistimen antureille asti. Sormenpään harjanne- ja laaksoalueet kuitenkin aiheuttavat signaaliin eroja, joita antureilla voidaan mitata. Näiden erojen avulla saadaan muodostettua kuva harjanne- ja laaksoalueiden sijainnista eli sormenjäljestä. [2, s. 38]

Termiset sormenjälkisensorit perustuvat lämpötilan muutokseen. Laitteen anturin pinta on eri lämpötilassa kuin sen päälle asetettavan sormenpään harjanteet, jotka koskevat anturin pintaa. Lämpötilaero aiheuttaa lämmön siirtymistä anturin pinnan ja sormenpään välillä. Lämmön siirtymistä ei puolestaan tapahdu sormenpään laaksoalueiden kohdalla, koska ne eivät ole kosketuksissa anturin pinnan kanssa. [2, s. 38] Lämmön siirtyminen muuttaa anturin pyrosähköisen materiaalin lämpötilaa, jolloin muutosta vastaava virta saadaan kulkemaan virtapiirissä. Tätä virtaa käsittelemällä saadaan luotua digitaalinen kuva sormenjäljestä. [1, s. 62]

Ultraäänisensorit perustuvat puolestaan sormenpähän lähetetyn ultraäänisignaalin heijastuksen mittaamiseen, jolloin heijastuneiden signaalien avulla saadaan koostettua kuva sormenjäljestä. Näiden sensorien haittana on kuitenkin niiden kallis hinta. [1, s. 62]

Sormenjälkisensorien erilaisista tekniikoista huolimatta niillä kaikilla saadaan tuotettua digitaalinen kuva sormenjäljestä. Kuvan laatuun ja sen käyttömahdollisuuksiin vaikuttavat monet asiat, kuten kuvatarkkuus eli resoluutio, harjannekuvion selkeys sekä se, miten isolta alueelta kuva saadaan muodostettua. [1, s. 63] Lopulta muodostettua kuvaa

voidaan verrata toiseen kuvaan hyödyntäen esimerkiksi erilaisia signaalinkäsittelytekniikoita osana vertailuprosessia. Oleellista vertailussa on se, että pystytään tunnistamaan sormenjälkikuvan vastaavuus tiettyyn sormenjälkeen pienistä eroista huolimatta. Eroja voivat aiheuttaa esimerkiksi sormenpään pienet haavaumat tai sormenpään erilainen asento anturin pinnalla. [2, s. 44]

3. CMOS-MIKROPIIRITEKNIikka

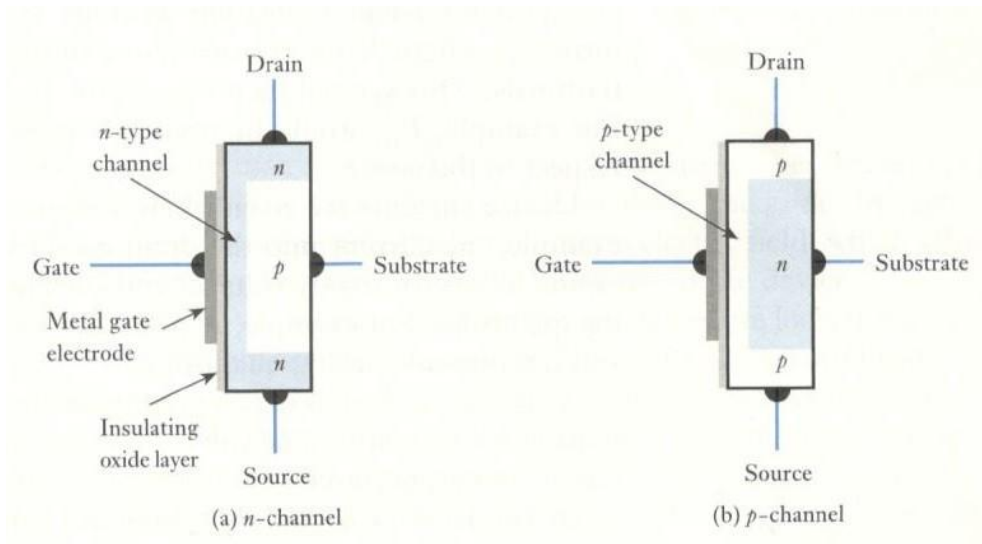
Lyhenne CMOS muodostuu sanoista Complementary Metal Oxide Semiconductor. Sannalla complementary viitataan siihen, että piirissä kaksi erilaista metallioksidipuolijohdekanavatransistoria (MOSFET, engl. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, metallioksidipuolijohdekanavatransistori) yhdistetään toisiinsa. Tällaisen kytkennän etuja ovat esimerkiksi alhaiset tehohäviöt sekä hyvä häiriönsietokyky. Hyvien ominaisuuksiensa vuoksi CMOS-tekniikkaa käytetäänkin nykyään laajalti erilaisissa sovelluksissa. [5, s. 483 – 484]

CMOS-tekniikkaa voidaan hyödyntää kapasitiivisessa tunnistuksessa siten, että tunnistuselektrodit toteutetaan CMOS-sirun päälle. Tällöin ulkoinen objekti on elektrodien ja CMOS-rakenteen välityksellä mitattavissa sisäisen elektroniikkapiirin avulla. [6, s. 25 – 26] CMOS-tekniikkaa voidaan siis hyödyntää myös osana kapasitiivisten sormenjälkisensorien anturipiiriä [3][7][8].

3.1 Metallioksidipuolijohdekanavatransistorit

MOSFET:it ovat kolmiterminaalisia elektroniikan komponentteja. Terminaalit ovat nimeltään nielu, lähde ja hila. Näistä nielu ja lähde muodostuvat n- tai p-tyyppin puolijohdeesta. Hilaterminaalit on puolestaan kiinni metallisessa elektrodissa, joka on eristemateriaalin kautta kytketty rakenteen substraattiin. Myös substraatti muodostuu puolijohdemateriaalista, mutta tämä materiaali on nielun ja lähteen materiaalille vastakkaisen tyyppinen. N-tyyppin puolijohdeella tarkoitetaan puolijohdetta, johon on saostettu pieniä määriä epäpuhtausatomeja, jotka voivat luovuttaa vapaita elektroneja rakenteeseen. P-tyyppin puolijohdeet on sen sijaan saostettu epäpuhtausatomeilla, jotka pystyvät vastaanottamaan vapaan elektronin elektronikuorensa tyhjään tilaan, aukkoon. [5, s. 144, 170 – 173]

Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva n- ja p-tyyppin MOSFET:eistä. Kanavatransistoreissa virta kulkee nielun ja lähteen välissä olevan kanavan kautta. Kanava on samantyyppistä puolijohdemateriaalia kuin nielu ja lähde. [5, s. 173] Tämä huomataan myös kuvasta 1, jossa n-tyyppisen transistorin nielu ja lähde ovat yhdistyneet n-tyyppisen kanavan kautta. Kanava sijaitsee hilan ja p-tyyppisen substraattialueen välissä. P-tyyppisen transistorille kanava on puolestaan p-tyyppinen ja se sijaitsee hilan ja n-tyyppisen substraatin välissä. [5, s. 173]



Kuva 1: nMOS- ja pMOS-kanavatransistorien perusrakenne [5 s.172].

MOSFET:it voidaan jakaa kahteen ryhmään sen perusteella, onko kanava olemassa ilman nolasta eroavaa hilajännitettä. Jos kanavaa ei ole, on transistori avaustyyppinen (enhancement MOSFET). Jos kanava taas on olemassa ilman hilajännitettä, on transistori sulkutyyppinen (depletion MOSFET). Sekä p- että n-tyyppiset MOS-transistorit voivat olla joko sulkutyyppisiä tai avaustyyppisiä. [5, s. 174]

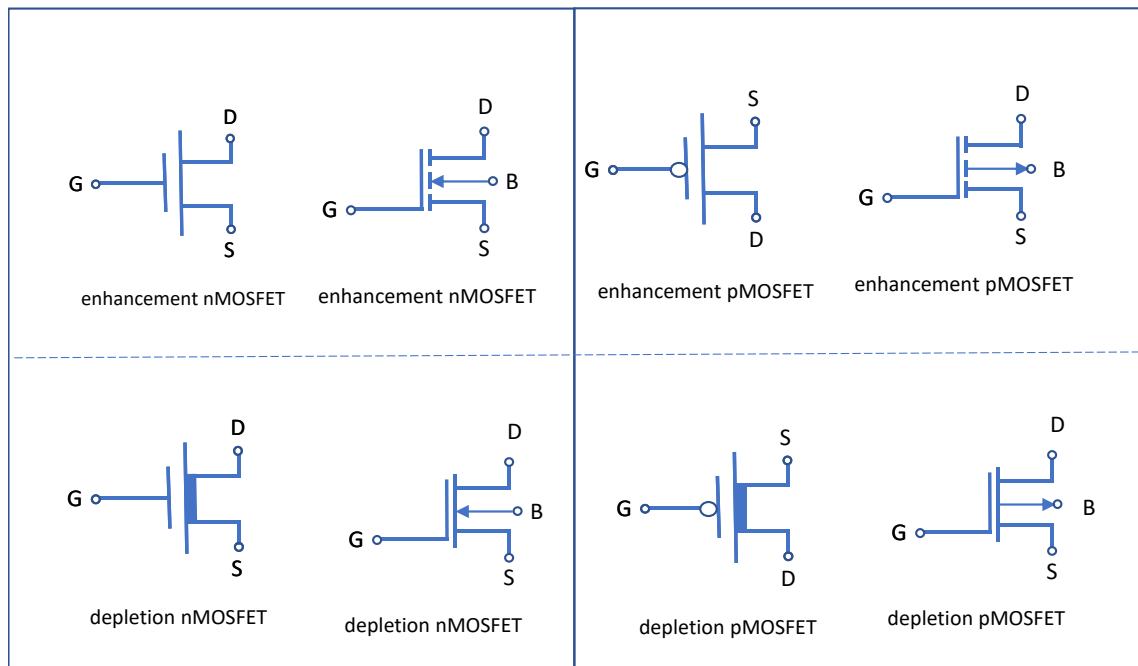
Avaustyyppisellä transistorilla kanavaa ei siis ole olemassa ilman hilajännitettä. Jos transistori on n-tyyppinen, tarvitaan hilalle nolaa suurempi hilajännite V_{GS} . Tällöin hilalla on positiivinen jännite, joka vetää puoleensa nielun ja lähteen vapaita elektroneja. P-tyyppisen substraatin positiivisia ioneja puolestaan hyljeksitään. Näin nielun ja lähteen välille syntyy n-tyyppinen kanava. Jos hilajännite on vähintään transistorille ominaisen kynnsjännitteen suuruinen, saadaan virta kulkemaan nielulta lähteelle, kun nieluterminaalien syötetään positiivinen jännite. [9, s. 184 – 185]

Jos avaustyyppinen transistori on p-tyyppinen, tarvitaan hilalle negatiivinen jännite, jotta kanava saadaan muodostettua. Tällöin negatiivinen hila vetää puoleensa nielun ja lähteen vapaita aukkoja eli tyhjiä elektronipaikkoja. N-tyyppisen substraatin vapaita elektroneja puolestaan työnnetään kauemmaksi hilan läheisyydestä. Tällöin nielun ja lähteen välille syntyy p-tyyppinen kanava. Jos hilajännite on negatiivista kynnsjännitettä pienempi eli itseisarvoltaan kynnsjännitteen itseisarvoa suurempi, saadaan virta kulkemaan kanavassa. Virta saadaan kulkemaan, kun nielulle syötetään lähteen suhteen negatiivinen jännite. Tällöin virta kulkee lähteeltä nielulle. [9, s. 190]

Sulkutyyppisillä MOSFET:eillä kanava on valmiiksi olemassa. Se on tuotettu transistorin rakenteeseen jo valmistusvaiheessa. [9, s. 214 – 215] Näin ollen positiivisten ja negatiivisten hilajännitteiden avulla voidaan muuttaa nielun ja lähteen välisen kanavan leveyttä

[5, s. 174]. Kanavan koon muuttaminen muuttaa transistorin läpi kulkevan virran suuruutta. N-tyyppisessä transistorissa virtaa kuitenkin kulkee, vaikka hilajännitettä ei ole, jos nielulla on nollaa suurempi jännite. P-tyyppisessä transistorissa virta puolestaan kulkee ilman hilajännitettä, jos nielulle syötetään nollaa pienempi jännite. [9, s. 214 – 215]

Eri lähteissä käytetään erilaisia piirrosmerkkejä transistorille. Kuvaan 2 onkin koottu erilaisia piirrosmerkkejä MOS-kanavatransistoreille, jotta tässä kandidaatintyössä esitetyjä piirejä olisi helpompi tulkita.



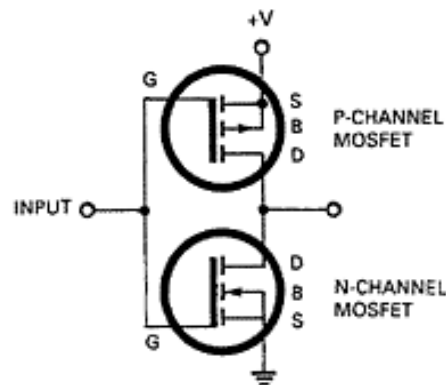
Kuva 2: MOS-kanavatransistorien erilaisia piirrosmerkkejä, mukailten lähteitä 5 ja 9.

Näitä MOS-transistoreita voidaan käyttää CMOS-piirien rakentamiseen. CMOS-piirissä n- ja p-tyypin transistorit yhdistetään toisiinsa. Pääidea tällaisessa rakenteessa on se, että toinen transistorista on aina johtavassa tilassa samalla kun toinen on suljetussa tilassa. Näin ollen kytkennän ulostulon arvo saadaan vaihdettua sen mukaan, kumpi transistori on johtavassa tilassa. [5, s. 214]

3.2 CMOS-piirin rakenne ja toiminta

Yksinkertainen CMOS-piiri voidaan rakentaa liittämällä yhteen avaustyyppiset nMOS- ja pMOS-transistorit. Rakenteessa p-tyyppisen transistorin lähde kytketään positiiviseen jännitteeseen ja n-tyyppisen transistorin lähde kytketään puolestaan maahan. Transistorien nielutermiinit yhdistetään toisiinsa. Piirin ulostulojännite mitataan näiden nielu-

terminaalien välistä. Myös molempien transistorien hilat kytketään yhteen. Sisäänmenojännite syötetään hilaterminaalien välille. [10] Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva CMOS-kytkennästä.



Kuva 3: CMOS-kytkennän rakenne [10].

Kuvan 3 CMOS-piirissä n-tyypin transistori on johtavassa tilassa, kun sisäänmenojännite on jännitteen +V suuruinen. Samaan aikaan p-tyypin transistori on suljetussa tilassa eli sen nielun ja lähteen välillä ei ole kanavaa, jota pitkin virta voisi kulkea. Näin ollen ulostulo kytkeytyy maahan eli ulostulossa nähdään 0 V:in jännite. Toisaalta sisäänmenojännitteellä 0 V p-tyypin transistori on johtavassa tilassa ja n-tyypin transistori suljetussa tilassa. Tällöin ulostulossa nähdään käyttöjännitteen +V suuruinen jännite. Sisäänmenojännitettä muuttamalla saadaan ulostuloon siis joko käyttöjännitteen tai nollan voltin suuruinen jännite. [5, s. 214, 483 – 484]

Kuvan 3 kytkentä voidaan ajatella loogisena invertterinä (NOT-portti). Jos invertteriin syötetään sisään looginen 0, saadaan ulostuloon looginen 1. Jos sisäänmenoon syötetään puolestaan looginen 1, saadaan ulostuloon looginen 0. [10, s. 2, 8 – 9] Kuvan 3 tapauksessa loogista nollaa vastaa jännite 0 V ja loogista ykköstä vastaa jännite +V. Kuvan 3 transistoreja voidaan siis ajatella kytkiminä, joista toinen on aina auki ja toinen kiinni. Koska vain toinen transistoreista on vuorollaan johtavassa tilassa, on kytkennän ulostuloresistanssi hyvin pieni. Myös kytkennän tehonkulutus on vähäistä, koska merkittäviä tehohäviöitä syntyy vain silloin, kun kytkentä vaihtaa tilaa. Tällöin molemmat transistorit ovat hetkellisesti johtavassa tilassa. [5, s. 483 – 484]

CMOS-piirejä voidaan valmistaa erilaisilla prosesseilla. Yksi mahdollinen tapa on aloittaa n-tyypin substraatista, jonka päälle muut kerrokset muodostetaan. Valmistusprosessin vaiheita ovat muun muassa hapetus, optinen litografia ja etsaus. Hapetuksessa materiaali päästetään kosketuksiin ilman kanssa, jolloin materiaalin pintaan syntyy oksidikerros. Optisessa litografiassa prosessoitavaan kiekkoon voidaan muodostaa valmiiksi suunniteltujen maskien avulla alueita, joita voidaan muokata esimerkiksi hapettamalla.

Optisessa litografiassa voidaan käyttää esimerkiksi UV-valoa (engl. Ultraviolet, ultravioletti) maskikuvioiden siirtämiseen kiekolle. Etsausvaiheessa prosessoitavan kiekon pinnalta poistetaan kerroksia kemiallisesti tai fyysisesti. CMOS-mikropiirin valmistus tapahtuu puhdistilassa, jossa ympäristön olosuhteita pystytään kontrolloimaan tarkasti. [9, s. 149 – 160, 163 – 168]

CMOS-piirien tuotantoprosesseissa yhdelle pienelle sirulle voidaan tuottaa lukuisia transistoreja [11, s. 1]. Tällöin puhutaan mikropiireistä eli integroiduista piireistä (IC, engl. Integrated Circuit, integroitu piiri), joissa suuri määrä komponentteja on kytketty erottamattomasti toisiinsa [12]. CMOS-mikropiireissä suuri määrä komponentteja saadaan mahtumaan pieneen tilaan, mikä yhdessä muiden CMOS-tekniikan hyötyjen kanssa on johtanut piirien laajaan käyttöön erilaisissa sovelluksissa. [11]

3.3 CMOS-tekniikka sormenjälkitunnistimen anturipiirissä

Kapasitiivisessa sormenjälkitunnistuksessa sormenpää toimii biologisena objektina, joka vaikuttaa anturipiirin kapasitanssiin. Anturipiiri itsessään koostuu tunnistuselektrodeista, jotka on koottu kaksikulotteiseen anturimatriisiin. [2, s. 37 – 38] Jokainen anturimatriisin solun elektrodi toimii rajapintana biologisen objektin ja elektronisen mittauspiirin välillä. Nämä tunnistuselektrodit voidaan valmistaa suoraan CMOS-piirin päälle. [6, s. 25 – 26]

Elektrodit voivat olla suoraan kosketuksissa mitattavan objektin kanssa tai niiden päällä voi olla yksi tai useampi passivointikerros. Mikäli elektrodimetallina käytetään alumiinia, syntyy sen pintaan luonnollisesti ohut alumiinioksidikerros. Tämä passivointikerros parantaa elektrodin kestävyttä. [6, s. 26 – 27]. Passivointikerroksen tarkoituksena on myös suojata CMOS-sirua ja sen päällä olevia elektrodeja esimerkiksi vedeltä ja muilta mahdollisilta epäpuhtauksilta [9, s. 167]. Alumiinia paremmin suoraan objektin kanssa kosketuksessa olevina elektrodeina toimivat jalometallielektrodit, jotka eivät hapetu ilman hapen vaikutuksesta. Tällaisia jalometalleja ovat esimerkiksi kulta ja platina. [6, s. 26 – 27] Sormenjälkitunnistimissa passivointikerros voi koostua myös esimerkiksi piinitridistä (silicon nitride, Si_3N_4) ja piidioksidista (silicon oxide, SiO_2) [7].

CMOS-sirujen valmistusprosesseja on erilaisia ja valittu prosessi riippuu siitä, mihin lopullista sirua aiotaan käyttää. Valmistuksen perusvaiheet ovat kuitenkin kaikille prosesseille kutakuinkin samoja, vaikka yksityiskohdat vaihtelevatkin. [9, s. 163] Kapasitiivisia sormenjälkisensoreita voidaan valmistaa hyödyntämällä esimerkiksi 0,35 μm :in 1-poly-pii-4-metalli -standardiprosessia (1P4M, engl. 1-polysilicon-4-metal) [8]. Toisaalta sensoreita voidaan valmistaa myös 0,35 μm :in 2-poly-pii-4-metalli -prosessilla (2P4M, engl. 2-polysilicon-4-metal) [9]. Puolijohdeteollisuudessa prosesseja erotellaan muun muassa

prosessissa valmistettujen transistorien hilaterminaalin leveyden mukaan (gate width) [13]. Näin ollen 0,35 μm :in eli 350 nm:in prosessissa pituus 350 nm viittaa valmistetun puolijohdekanavatransistorin hilaterminaalin leveyteen. Kapasitiivisia sormenjälki-sensoreita valmistettaessa voidaan käyttää myös esimerkiksi 130 nm:in valmistus-prosessia [14].

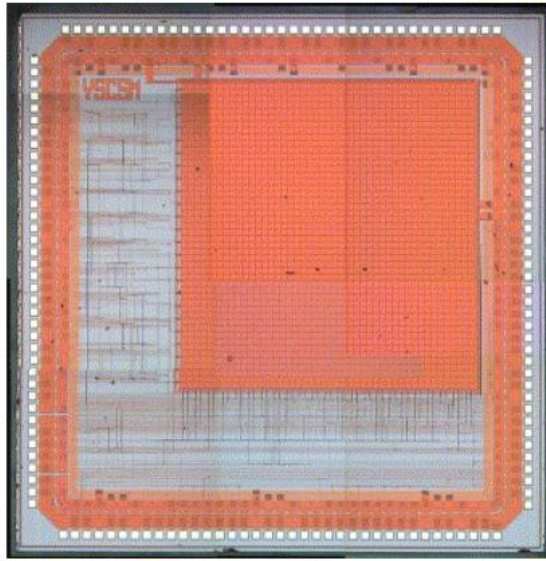
Puolijohdeteollisuuden valmistusprosesseja voidaan erotella myös sen mukaan, mon-tako metalli- ja polypiikerrosta prosessissa tuotetaan. Polypii eli monikiteinen pii voidaan valmistaa hiekasta prosessissa, jossa hiekka muutetaan puhtaaksi piiksi. Tuotetulla piillä on prosessoinnin jälkeen kiteinen rakenne. Tästä monikiteisestä piistä saadaan tuotettua piikiekoja, joiden pintaan IC-piirit valmistetaan. [13] Näin ollen 1-polypii-4metalli-prosessissa tuotetaan yksi kerros monikiteistä piitä ja neljä metallikerrosta. Vastaavasti 2-polypii-4-metalli -prosessissa polypiikerroksia tuotetaan yhden sijaan kaksi.

Puolijohdeteollisuuden prosessit kehittyvät jatkuvasti. Kehityksen myötä transistorien hilaterminaalien leveyksiä on saatu pienennettyä. Kun hilaterminaalin koko pienenee, muuttuu koko transistori pienemmäksi. Pienempiä transistoreja mahtuu aikaisempaa enemmän samalle piikiekolle. Transistorin hilaterminaalin pieneneminen myös kasvattaa transistorin nopeutta. Puolijohdeteollisuus onkin tähtäämässä vain muutamien nano-metrien levyisiin hilaterminaaleihin. [13] Esimerkiksi Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), yksi alan suurista yrityksistä, on vuosien 2016 ja 2018 välillä kehittänyt 7 nm:in valmistusprosessia [15]. Prosessien kehittyessä myös kapasi-tiivisten sormenjälkitunnistimien anturipiirien valmistusprosesseissa siirrytään luultavasti aikaisempaa pienempiin hilaterminaalien leveyksiin.

Monivaiheisten valmistusprosessien jälkeen integroitu piiri on valmis testattavaksi [13]. Kapasitiivisissa sormenjälkisensoreissa piirillä on monta tunnistuselektrodia. Nämä elektrodit on järjestetty kaksiulotteiseen matriisiin, jossa yksi solu vastaa yhtä elektrodia. [2, s. 37 – 38] Metallisten tunnistuselektrodien lisäksi jokaisessa solussa on oma anturi-piirinsä (sensing circuit), joka on kytketty solun elektrodiin [3, 7, 8, 14]. Anturipiirille ei ole olemassa tiettyä määriteltyä rakennetta, vaan se vaihtelee eri toteutuksien mukaan. Eri-laisiin anturipiireihin perehdytään tarkemmin tämän kandidaatintyön neljännessä lu-vussa. Yhteistä kaikille anturipiireille on kuitenkin se, että ne tunnistavat muutoksen piirin kapasitanssissa ja tuottavat ulostulonaan muutosta vastaavan jännitteen [7, 8]. Piiri voi muuttaa kapasitanssvaihtelut myös virraksi jännitteen sijaan [3, 14].

Sormenjälkisensorin tunnistuselektrodimatriisin koko voi vaihdella sovelluksen mukaan. Matriisi voi olla kooltaan esimerkiksi 32 x 32 [3], 8 x 32 [7], 48 x 48 [8] tai 20 x 16 [14]. Näin ollen esimerkiksi 48 x 48 kokoisessa anturimatriisissa on yhteensä 2304 solua eli

myös tunnistuselektrodeja on yhteensä 2304 kappaletta. Kuvassa 4 on esitetty tarkennettu kuva eräästä sirusta, jossa matriisin koko on 48 x 48.



Kuva 4: Kapasitiivinen sormenjälkisensori [8].

Tuotetun sormenjälkikuvan laatuun vaikuttaa esimerkiksi resoluutio eli kuvatarkkuus. Kuluttajamarkkinoille suunnatuissa tuotteissa resoluutio saattaa olla optimaalista arvoa pienempi, koska pienempi resoluutio tarkoittaa yleensä sitä, että sensori on halvempi. Yleensä hyvä kuva saadaan tuotettua, kun kuvassa yhtä tuumaa kohden on 500 kuvapistettä eli pikseliä. Tämä voidaan ilmaista resoluutiona 500 dpi (engl. dots per inch, pistettä tuumaa kohden) tai 500 ppi (engl. pixels per inch, kuvapistettä tuumaa kohden). Lainvalvonnassa käytetään myös tarkkuutta 1000 ppi. [1, s. 63]

Sormenjäljen piirteitä voidaan kuvata kolmella eri tasolla. Ensimmäisen tason piirteitä ovat harjanteiden yleinen vuorottelu ja niiden tiheys. Näiden kuvantamiseen riittää yleensä noin 250 ppi:n kuvatarkkuus. Toisen tason piirteitä ovat harjanteiden tarkat sijainnit. Toisella tasolla ei kuitenkaan huomioida vielä harjanteiden tarkkoja mittoja tai muotoja. Tämän tason piirteiden kuvantaminen onnistuu hyvin noin 500 ppi:n resoluutiolla. Kolmannella tasolla tulkitaan lisäksi harjanteiden tarkkoja muotoja. Tällöin huomioidaan myös esimerkiksi hikihuokokset ja harjanteen reunan muodot. Kolmannen tason piirteiden kuvaaminen vaatii 1000 ppi:n resoluution. [1, s. 55 – 58]

Esimerkiksi edellä kuvatussa 48 x 48 kokoisessa anturimatriisissa resoluutio on 432 dpi, kun yhden pikselin koko on 58 μm x 58 μm ja pikselien etäisyys toisistaan (pixel pitch) on 60 μm [8]. Edellä mainitussa 8 x 32 kokoisessa anturissa kuvatarkkuus on 390 dpi [7]. Esitetylle 20 x 16 kokoiselle anturille resoluutio on puolestaan 282.2 dpi [14].

4. KAPASITIIVISET SORMENJÄLKITUNNISTIMET

Kondensaattori on laite, joka koostuu kahdesta toisistaan erillään olevasta johtavasta kappaleesta. Kappaleet voivat olla esimerkiksi metallilevyjä. Näiden kappaleiden välille saadaan syntymään sähkökenttä, kun toinen kappaleista varataan varauksella $+Q$ ja toinen varauksella $-Q$. Oleellista on, että näiden levyjen välillä on jotakin eristemateriaalia, kuten ilmaa. Näin ollen kondensaattorien levyjen välille saadaan syntymään sähkökenttä, johon voidaan varastoida energiaa. Kapasitanssi puolestaan on kondensaattorin ominaisuus. Se saadaan määritettyä, kun lasketaan kondensaattorin yhden levyn varauksen ja levyjen välisen potentiaalieron osamäärä. [16]

Kapasitiivisissa sormenjälkitunnistimissa sormenjälki saadaan muodostettua sormenpään harjanteiden ja laaksojen aiheuttamien erisuuruisten kapasitanssien ansiosta. Anturipiireille on monia mahdollisia kytkentöjä, mutta oleellista kuitenkin on se, että kapasitanssivaihtelut saadaan mitattua ja muutettua joko virraksi tai jännitteeksi. Lopulta näiden virtojen tai jännitteiden avulla saadaan muodostettua digitaalinen kuva sormenjäljestä. [3, 7, 8, 14]

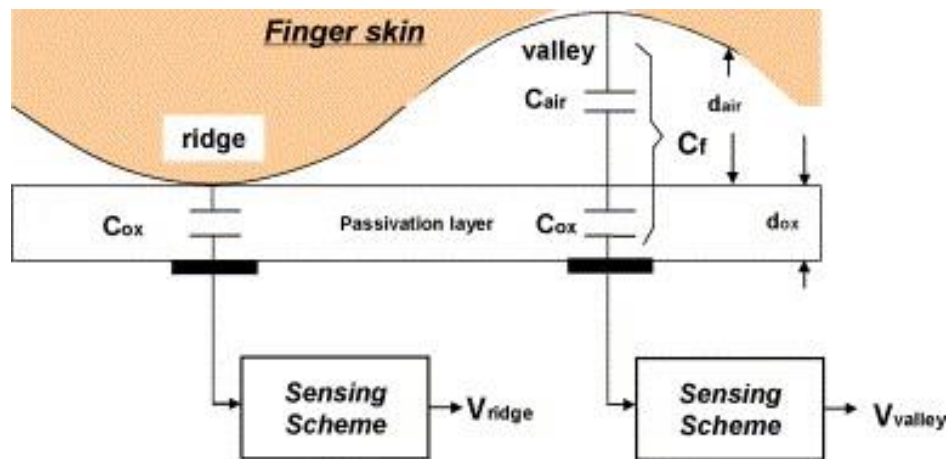
4.1 Kapasitanssin merkitys anturipiirissä

Ihmiskeho on enimmäkseen vettä. Veden suhteellinen permittiivisyys eli dielektrinen vakio on suuruudeltaan noin 80. Ilmalle vastaava vakio on noin 1,0006. [17] Kondensaattorin eristemateriaalin eristeominaisuudet vaikuttavat sen kapasitanssiin. Näitä ominaisuuksia voidaan kuvata materiaalin suhteellisella permittiivisyydellä (ϵ_r), joka kuvaa materiaalin permittiivisyyttä suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen. Materiaalin permittiivisyys kuvaa sitä, miten ulkopuolinen sähkökenttä vaikuttaa sähkövuon tiheyteen polarisoimalla eristemateriaalia. [16] Veden korkeahkon suhteellisen permittiivisyyden vuoksi ihmisen pehmytkudos onkin suhteellisen hyvä eristemateriaali. Näin ollen sormenpään asettaminen kapasitiivisen sormenjälkisensorin pinnalle muuttaa sensorin suhteellista permittiivisyyttä ihmiskehon suhteellisen permittiivisyyden takia. Tämän vuoksi myös sensorin mitaaman kapasitanssin arvo muuttuu. [17]

Ihmiskehon iho on toisaalta johtava materiaali. Näin ollen myös sormenpään iho johtaa sähkövarausta. Sormenpään voidaan ajatella olevan virtuaalisesti maadoitettu kehon kautta, koska ihmiskeho itsessään pystyy varastoimaan suuren määrän sähkövarausta. Jos sormenpää asetetaan kapasitiivisen sormenjälkisensorin päälle, muodostaa sormen iho kondensaattoreita sensorimatriisin elektrodien kanssa. Metallinen elektrodi on siis

kondensaattorin toinen levy ja sormenpään ihokaistale toinen levy johtavuutensa ansiosta. [17] Sormenpään ihon ja metallisen elektrodin välissä on elektrodien päälle tuotettu passivointikerros sekä mahdollisesti sormenpään laaksoalueen takia syntyvä ilmaväli [3].

Sormenjälkisensorin metallielektrodin ja sen päällä olevan passivointikerroksen välillä on kapasitanssia, jonka arvo määräytyy passivointikerroksen paksuuden ja sen suhteellisen permittiivisyyden mukaan. Jos kondensaattorin toisen levyn muodostaa sormenpään laaksoalue, jää sormenpään ihon ja elektrodin väliin passivointikerroksen lisäksi myös ilmaa. Harjannealueen kohdalla tällaista ilmaväliä ei jää. Aistittu kokonaiskapasitanssi muodostetaan passivointikerroksen ja mahdollisen ilmavälin aiheuttaman kapasitanssin sarjakapasitanssina. [8] Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva muodostuvista kapasitansseista.



Kuva 5: Periaatekuva sormenjälkisensorin kapasitansseista [8].

Sormenpään aiheuttamat kapasitanssit voidaan esittää pinta-alojen, etäisyyksien ja materiaalien permittiivisyyksien avulla muodossa

$$C = \frac{A\varepsilon}{d}, \quad (1)$$

jossa A on tunnistuselektrodin pinta-ala, d on sormenpään etäisyys sensorin pinnasta ja ε on permittiivisyys. Harjannealueen aiheuttama kapasitanssi on laaksoalueen aiheuttamaa kapasitanssia suurempi, koska harjannealue on lähempänä sensorin pintaa. [3] Tämä nähdään myös kaavasta 1, jossa etäisyyden d pieneneminen kasvattaa kapasitanssia C .

Laaksoalue ei ole suoraan kosketuksissa sensorin pinnan kanssa. Muodostuneeseen kokonaiskapasitanssiin vaikuttaa näin ollen myös ilmvälin kapasitanssi. Tämä kapasitanssi on sarjassa passivointikerroksen kapasitanssin kanssa, jolloin yhteiskapasitanssi voidaan laskea kaavalla

$$C_f = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}}, \quad (2)$$

jossa C_1 on passivointikerroksen kapasitanssi ja C_2 on ilmvälin aiheuttama kapasitanssi. Ilmvälin kapasitanssi on passivointikerroksen kapasitanssia selvästi pienempi. [3] Kuvan 5 tapauksessa harjannealueen kohdalla kokonaiskapasitanssi olisi siis suuruudeltaan C_{ox} ja laaksoalueen kohdalla se olisi kapasitanssien C_{ox} ja C_{air} kaavan 2 mukaisen sarjakapasitanssin suuruinen.

E erityisen oleellista kapasitiivisissa sormenjälkisensoreissa on se, että niiden pitää pystyä havaitsemaan hyvin pieniä kapasitansseja, joiden suuruus on vain femtofaradien luokkaa [8]. Sormenjälkisensorit ovat erilaisia ja siten ne pystyvät havaitsemaan eri suuruisia kapasitansseja. Jotkin sensorit voivat havaita esimerkiksi sormenpään aiheuttamia kapasitansseja, joiden suuruus on jotain 0 fF:n ja 60 fF:n väliltä [3]. Toiset sensorit voivat puolestaan havaita esimerkiksi 12 fF:n suuruisia muutoksia [7].

Pienten kapasitanssien lisäksi kapasitiivisten sormenjälkisensorien suunnittelussa on muitakin haasteita. Yksi merkittävä haaste on pystyä minimoimaan sensorin elektroniikkapiirissä syntyvien sisäisten loiskapasitanssien vaikutusta. Myös ulkoiset loiskapasitanssit voivat vaikuttaa mitattavan kapasitanssin arvoon. [8] Näiden lisäksi myös sormenpään varastoituneet sähkövaraukset voivat hankaloittaa sensorin oikeanlaista toimintaa [3].

CMOS-sirun päälle tuotettuihin tunnistuselektrodeihin liittyy monia erilaisia loiskapasitansseja. Sisäisiä loiskapasitansseja voi syntyä esimerkiksi kahden tunnistuselektrodin välille. [6, s. 31] Niitä voi syntyä myös sensorimatriisin tunnistuselektrodien ja CMOS-sirun substraattikerroksen välille [3]. Ulkoisia loiskapasitansseja puolestaan syntyy esimerkiksi sensorin pinnan likaantuessa käytön myötä. Tällöin loiskapasitanssia syntyy tämän lian ja sensorin pinnan välille, mikä luonnollisesti vaikuttaa sensorin mitattaman kapasitanssin arvoon. [8]

Ihmisen sormenpään varautuneeseen sähkövaraukseen vaikuttavat ilmankosteus ja sormen pinnalla vallitsevat olosuhteet. Kuten jo aiemmin mainittiin, sormenpään ajatellaan olevan virtuaalisesti maadoitettu kehon kautta. Hyvin kuivaan sormenpään voi kuitenkin sen suuren resistanssin takia syntyä nollasta poikkeava jännite, mikä puoles-

taan on ristiriidassa oletettujen mittaolosuhteiden kanssa. Sormenpään sähkövaraukset voivat olla haitaksi sensorille myös silloin, kun nämä varaukset pääsevät purkautumaan sormesta sensorille. Sensorin tunnistuselektrodit on yleensä kytketty MOS-transistorien hilaterminaaleihin, jotka ovat herkkiä sähköstaattisille purkauksille (ESD, electrostatic discharge). [7]

Näihin kapasitiivisten sormenjälkisensorien ongelmiin ja haasteisiin on olemassa monia erilaisia ratkaisuja. Mahdollisiin ratkaisuihin perehdytään tarkemmin tämän kandidaatin työn aliluvussa 4.3 erilaisten tunnistuspiirien rakenteen yhteydessä, koska osa näistä rakenteista on suunniteltu erityisesti minimoimaan jotakin esitetystä ongelmista.

4.2 Erilaiset tunnistusmenetelmät: pyyhkäisy- ja kosketustunnistus

Kapasitiiviset sormenjälkitunnistimet voivat olla joko pyyhkäisy-tunnistimia tai kosketustunnistimia. Kosketustunnistimissa koko sormi painetaan sensorin päälle, kun taas pyyhkäisy-tunnistimissa sormenpäästä liikutetaan pyyhkäisten sensorin päällä. Kosketustunnistin pystyykin tuottamaan suoraan sormenjälkikuvan koko sormenpäästä. Pyyhkäisy-tunnistimissa erilliset osakuvat pitää puolestaan saada yhdistettyä kokonaiskuvaksi [2, s. 37 – 38] Pyyhkäisy-tunnistimet ovat hyödyllisiä etenkin kuluttajaelektronikassa niiden pienen koon ja siten myös halvempien valmistuskustannusten takia [1, s. 63]. Tällaisia pyyhkäisy-tunnistimia voidaan käyttää esimerkiksi kannettavissa tietokoneissa tai puhelimissa [2, s. 38].

Pyyhkäisy-tunnistimissa haasteena on erilaisten pyyhkäisy-nopeuksien ja -kulmien huomioon ottaminen. Ilman niitä osakuvista ei saada tuotettua järkevästi mitoitettua ja eheää sormenjälkikuvaa. Yksi ratkaisu tähän ongelmaan on havaita peräkkäisten osakuvien päällekkäisyyksiä siten, että lopullinen kuva koostuu vain sellaisista kuvista, joissa ei ole keskinäistä limittymistä. Oletuksena tällaisessa tekniikassa on se, että yksi osakuva sisältää enemmän kuin yhden harjannekuvion. Toinen mahdollinen tapa ongelman ratkaisuun on mitata sormenpään pyyhkäisy-aikana kulkemaa matkaa. Näin voidaan kaikista osakuvista valita vain ne, jotka on otettu aina sormen liikuttua esimerkiksi 50 µm eteenpäin. Valituista osakuvista saadaan siten koostettua eheä sormenjälkikuva. [18, s. 50 – 51]

Kosketustunnistimista poiketen pyyhkäisy-tunnistimet voivat pienimmillään sisältää vain yhden rivin tunnistuselektrodeja [18, s. 57]. Pienimmillään sensorit voivat olla jopa vain 3 mm pitkiä [1, s. 63]. Myös pyyhkäisy-tunnistimet voidaan kuitenkin valmistaa piipohjaiselle mikropiirille [18, s. 57], joten kokoeroista huolimatta kosketus- ja pyyhkäisy-tunnistimien perusrakenne ja toiminta ovat hyvin samankaltaisia.

Nykyään ainakin halvassa kuluttajaelektronikassa kosketustunnistimet vaikuttavat olevan pyyhkäisy-tunnistimia yleisemmin käytettyjä. Kymmenisen vuotta sitten monissa kannettavissa tietokoneissa näytti olevan pyyhkäisytyyppinen sormenjälkitunnistin käytössä. Enää niitä ei kuitenkaan näy yhtä paljon. Ehkä tunnistimet eivät aikanaan toimineet tarpeeksi luotettavasti tai ehkä tavallinen kuluttaja vierasti sormenjälkensä näyttämistä koneelle sen varastamisen pelossa. Tietokoneiden sijaan sormenjälkitunnistusta käytetään nykyään esimerkiksi älypuhelimissa. Suurin osa näistä tunnistimista näyttää olevan kosketustyyppisiä. Tekniikan kehittyessä kosketustyyppiset tunnistimet on luultavasti saatu toteutettua tarpeeksi pieneen tilaan siten, että pyyhkäisy-tunnistimen pienestä koosta ei ole välttämättä suurta etua. Myös puhelinten koko, erityisesti älypuhelimien, on niin suuri, että myös kosketustyyppinen tunnistin mahtunee puhelimeen yhtä hyvin kuin pyyhkäisytyyppinenkin.

Kosketus- ja pyyhkäisy-tunnistusjaottelun lisäksi sormenjälkitunnistimia voidaan jaotella sen mukaan, ovatko ne itsenäisiä vai älylaitteen näyttöön integroituja. Näyttöön integroidun sensorin etuna on muun muassa se, että se ei vie tilaa laitteen pinnalta. Näin laitteen näyttö saadaan mahdollisesti suuremmaksi käyttämällä myös sitä tilaa, jossa itsenäinen sormenjälkisensori sijaitsisi. [14]

Näyttöön integroitu sensori voidaan toteuttaa kolmella eri sensorityypillä: ultraäänisensorilla, optisella sensorilla tai kapasitiivisella sensorilla. Ultraäänisensorin haittoja ovat sen valmistuksen monimutkaisuus ja tunnistuksen hitaus. Optiset sensorit ovat puolestaan herkkiä kirkkaasti valaistulle ympäristölle sekä sormen pinnan erilaisille olosuhteille, kuten kosteudelle. Ultraäänisensoreihin ja kapasitiivisiin sensoreihin verrattuna optisia sensoreita on mahdollisesti helpompaa käyttää myös väärennetyillä sormenjäljillä. Näytön alle integroitu kapasitiivinen sensori sen sijaan käyttää koko näytön pinnan yhteistä kapasitanssia sormenjälkitunnistuksen toteuttamiseen. Tällaisen sensorin haittana on kuitenkin suuren jännitteen tarve. Suuri jännite tarvitaan sekä näytön häiriöiden että ulkoisten häiriöiden mitätöimiseksi. [14]

Aikaisemmin itsenäiset kapasitiiviset sormenjälkitunnistimet ovat olleet näytön sisään integroituja tunnistimia yleisempiä. Tunnetuista puhelinvalmistajista esimerkiksi Samsung on käyttänyt itsenäisiä kapasitiivisiä sormenjälkisensoreita älypuhelimissaan. Itsenäisten sensorien etuna on niiden halpa hinta ja pieni tehonkulutus. [14] Vaikuttaa kuitenkin siltä, että näytön sisään integroidut tunnistimet ovat kehittyneet ja yleistyneet viime vuosien aikana. Tämä ala vaikuttaa erityisesti älypuhelimien ansiosta olevan jatkuvassa kehityksessä, joten pari vuotta sitten yleiset tunnistimet ovat luultavasti vanhentuneita nykyään. Yksi mielenkiintoinen näkökulma on myös optisten ja kapasitiivisten sensorien osuus

älypuhelinien sensoreista. Aikaisemmin optiset sensorit ovat olleet kookkaita kapasitiivisiin sensoreihin verrattuna [1, s. 61], mutta kehityksen myötä niidenkin koko luultavasti pienenee. Jos niin käy, optiset sensorit saattavat korvata kapasitiivisia sensoreita.

4.3 Kapasitiivisen sormenjälkisensorin ja anturipiirin rakenne

Kapasitiivisissa sormenjälkitunnistimissa laakso- ja harjannealueet voidaan siis tunnistaa niiden aiheuttamien erilaisten kapasitanssien avulla [2, s. 38]. Tässä aliluvussa esitellään erilaisia anturipiirejä sekä niiden kykyä käsitellä kapasitiivisissa sormenjälkitunnistimissa yleisesti esiintyviä ongelmia.

Kuvassa 6 a on esitetty periaatekuva yhdestä mahdollisesta anturipiiristä. Kuvassa 6 b on puolestaan esitetty todellinen MOS-transistoreilla ja jänniteseuraajalla toteutettu versio periaatekuvan piiristä. Periaatekuvan piirissä nähdään kolme kytkintä, joita ohjataan vaiheissa 1 ja 2. Ensimmäisessä vaiheessa (ϕ_1) jännite V_1 kytketään tunnistuslevyyn (sensing plate). Kondensaattori, jonka kapasitanssi on C_f , on kytketty maahan sormen ja siten ihmiskehon kautta. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on C_s , on puolestaan kytketty maahan oikeanpuoleisimman kytkimen kautta. Molempien kondensaattorien yli on jännite V_1 . Näin ollen levyn varaus Q saadaan laskettua kaavalla

$$Q = V_1(C_f + C_s), \quad (3)$$

jossa C_f on sormenpään aiheuttama kapasitanssi ja C_s on kahden levyn välinen kapasitanssi. [3]

Toisessa vaiheessa (ϕ_2) kytkentälevy (coupling plate) kytketään jännitteeseen V_2 ja ensimmäisen vaiheen kytkimet avataan. Tällöin kondensaattorin C_f yli on jännite V_{out} ja kondensaattorin C_s yli on jännitteiden V_{out} ja V_2 erotus. Levyn varaus saadaan siis laskettua kaavalla

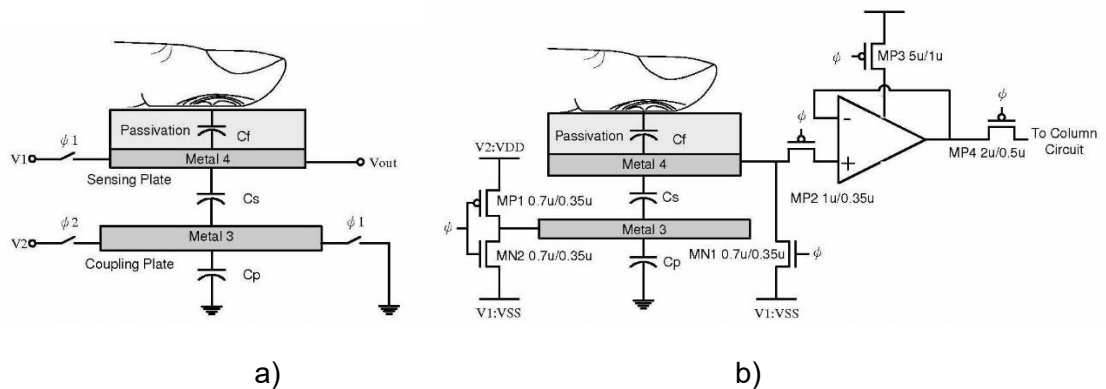
$$Q = V_{OUT}C_f + (V_{OUT} - V_2)C_s, \quad (4)$$

jossa C_f on edelleen sormenpään aiheuttama kapasitanssi ja C_s on kahden levyn välinen kapasitanssi. [3]

Kaavoilla 3 ja 4 lasketut varaukset ovat yhtä suuret, joten ulostulojännite saadaan kirjoitettua muotoon

$$V_{OUT} = V_1 + V_2 \left(\frac{C_s}{C_f + C_s} \right). \quad (5)$$

Kaavasta 5 huomataan siis, että ulostulojännite muuttuu, jos sormenpään aiheuttama kapasitanssi C_f muuttuu. Erisuuruisten ulostulojännitteiden mukaan voidaan siis määrittää, onko tunnistuselektrodin päällä sormenpään laakso- vai harjannealue. [3]



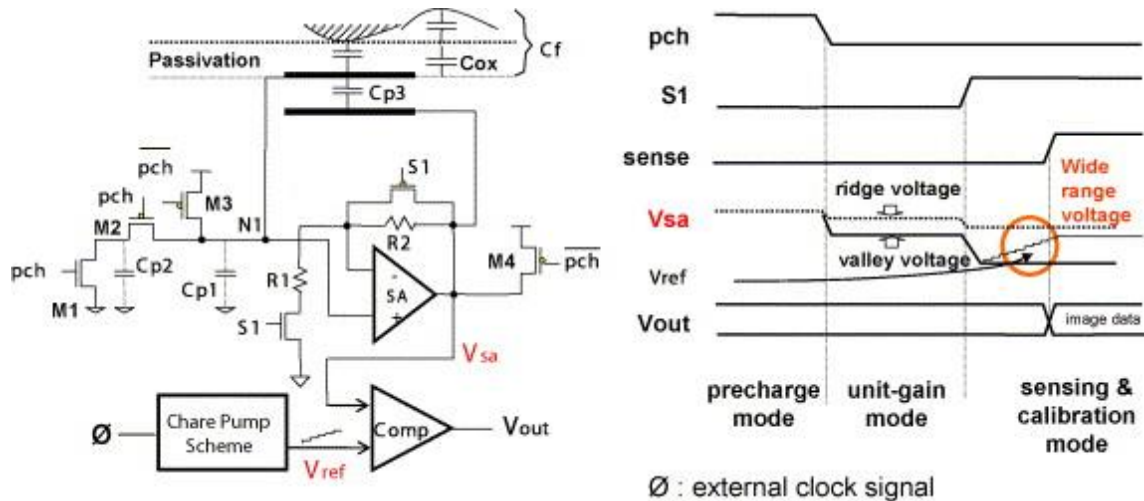
Kuva 6: a) Periaatekuva ja b) MOS-transistoreilla toteutettu kytkentä yhdestä mahdollisesta anturipiiristä [3].

Kuvan 6 b todellisessa kytkennässä perusidea on sama kuin kuvan 6 a periaatekytkennässä. Todellista kytkentää ohjataan yhdellä ainoalla vaiheella, joka sulkee ja avaa kytkennän transistoreja MP1, MN1 ja MN2 samalla tavalla kuin periaatekytkennässä avataan ja suljetaan kolmea kytkintä. [3]

Todellisen kytkennän transistoreilla on kuitenkin epäideaalisia ominaisuuksia. Ne aiheuttavat piiriin esimerkiksi parasiittista kapasitanssia. Epäideaalisuuksien takia jännitteitä V_1 ja V_2 ei myöskään voida sellaisenaan käyttää kaavassa 5, vaan niissä on huomioitava erilaisten epäideaalisuuksien vaikutus. Syntyviä parasiittisia kapasitansseja voidaan kuitenkin minimoida pienentämällä transistorien kokoa. Tämän vuoksi todellisen kytkennän transistorit ovat kaikki samaa kokoa ($0,7 \mu\text{m}/0,35 \mu\text{m}$). Myös kytkentään lisättyllä jännite-seuraajalla voidaan eristää parasiittista kapasitanssia, jota syntyy piirin reitityksen takia. [3]

Kuvan 6 b kytkennässä tarkoituksena on mitata yhtä elektrodimatriisin solua kerrallaan. Tehonkulutuksen vähentämiseksi jännite-seuraajan käyttövirtaa ohjataan transistorilla MP3. Näin ollen virtaa kulutetaan vain kulloinkin mitattavana olevan solun jännite-seuraajassa. Kuvan 6 b kytkennässä pyritään siis minimoimaan kapasitiivisen sormen-jälkitunnistimen tehonkulutusta sekä syntyviä parasiittisia kapasitansseja. [3]

Kuvassa 7 on esitetty toinen mahdollinen anturipiiri. Myös tällä kytkennällä pyritään minimoimaan sisäisiä parasiittisia kapasitansseja mahdollisimman hyvin. Toinen tämän kytkennän eduista on sen kyky laajentaa harjannealueen ja laaksoalueen välistä jännite-eroa, mikä helpottaa alueiden tunnistusta. Kytkennässä jännite-eroa saadaan suurennettua arvosta 610 mV jopa arvoon $1,720 \text{ V}$ asti. Kuvan 6 b kytkennästä eroten tässä kytkennässä komponentti SA toimii jännite-seuraajan lisäksi myös vaimentimena [8]



Kuva 7: Yksi mahdollinen anturiipiiri, jossa hyödynnetään vahvistinta ja komparaattoria [8].

Kytettä koostuu transistoreista M1, M2, M3 ja M4, joita avataan ja suljetaan kytkennän toiminnan eri vaiheissa. Kapasitanssit C_{p1} ja C_{p2} ovat reitityksestä aiheutuvia parasittisia kapasitansseja. Näiden lisäksi kytkennässä on vahvistin (SA, sensing amplifier), johon liittyy kaksi vastusta (R_1 ja R_2) sekä kaksi kytkimenä toimivaa MOS-transistoria. Komparaattoria eli vertailijaa käytetään piirissä tunnistamaan, onko jännite V_{SA} harjannealueen vai laaksoalueen kapasitanssista johdettu jännite. [8]

Kuvan 7 kytkentä toimii kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa (precharge mode) jännite V_{SA} esiasetetaan arvoon V_{DD} . Tämä saavutetaan sulkemalla transistorit M1, M3 ja M4 sekä avaamalla transistori M2. Ensimmäisessä vaiheessa varausta ei kerry kondensaattorien C_{p2} ja C_{p3} levyille, koska niiden molemmat levyt ovat samassa potentiaalissa. Kondensaattoreihin C_f ja C_{p1} saadaan sen sijaan varastoitua varaukset, joiden suuruus on kondensaattorin kapasitanssi jännitteellä V_{DD} kerrottuna. [8]

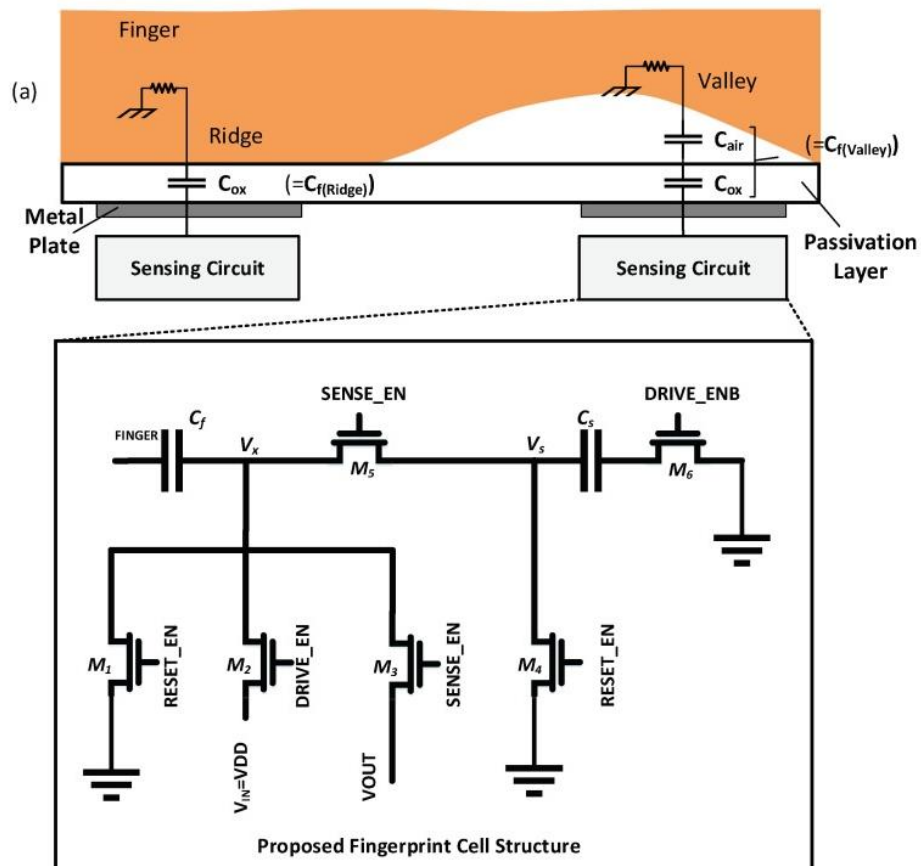
Toisessa vaiheessa (unit-gain mode) vahvistin SA toimii jänniteseuraajana. Se seuraa pisteessä N_1 tapahtuvia jännitemuutoksia, minkä takia kondensaattorin C_{p3} levyjen välinen potentiaaliero saadaan nollattua. Näin ollen kondensaattorin C_{p3} vaikutus piirissä saadaan minimoitua. Toisen vaiheen toiminnallisuus saavutetaan sulkemalla edellisessä vaiheessa avoimena olleet transistorit ja avaamalla aikaisemmin suljettuna olevat transistorit. Tässä vaiheessa transistori M2 on siis suljettu ja transistorit M1, M3 ja M4 ovat avoimia. Ohjaussignaali S1 on alhaalla siten, että vastusten R_1 ja R_2 läpi ei kulje virtaa. [8]

Kolmannessa eli viimeisessä vaiheessa (sensing and calibration mode) laaksoalueen kapasitanssista johdettua jännitettä pyritään laskemaan mahdollisimman lähelle 0 V ja harjannealueen kapasitanssista johdettu jännite pyritään pitämään mahdollisimman kor-

keana. Näin saavutetaan mahdollisimman suuri jännite-ero näiden kahden jännitteen välille. Tällöin vertailijan avulla saadaan helpommin tunnistettua, onko kyse laakso- vai harjannealueesta. Laaksoalueen jännitteen vaimennus saadaan aikaan käyttämällä komponenttia SA vaimentimena. Tämä saavutetaan nostamalla ohjaussignaali S1 ylös. [8]

Lopulta kuvan 7 kytkennässä saatua jännitearvoa V_{SA} voidaan verrata referenssijännitteeseen V_{ref} komparaattorin avulla. Ulostulossa voidaan nähdä vain kahta erilaista arvoa, jolloin arvosta suoraan tiedetään, onko kyseisen elektrodin kohdalla sormenpään harjanne- vai laaksoalue. [8]

Sormenjälkitunnistimen anturiipiiri voidaan toteuttaa myös kuvassa 8 esitetyllä tavalla. Samaan tapaan kuin edellä esitetyissä kytkennöissä, myös tässä kytkennässä toimintaa ohjataan avaamalla ja sulkemalla kytkennän MOS-transistoreja. Alussa kytkentä resetoidaan RESET_EN-signaalin avulla, jolloin kondensaattorit puretaan maahan. Tämän jälkeen kondensaattoria C_f ladataan jännitteellä V_{DD} signaalin DRIVE_EN ollessa ylhäällä. Lopulta signaalin SENSE_EN avulla varaus saadaan jakautumaan kondensaattorien C_f ja C_s välillä. Ulostulon V_{OUT} arvo riippuu kapasitanssin C_f arvosta, joka puolestaan riippuu siitä, onko kyseessä sormenpään laakso- vai harjannealue. [14]



Kuva 8: Eräs mahdollinen anturiipiiri kuudella MOS-transistorilla toteutettuna [14].

Kuvan 7 sensorista eroten kuvan 8 sensorissa ulostulojännitteitä ei verrata referenssi-jännitteeseen, vaan kahden peräkkäisen solun jännitteitä verrataan keskenään. Kyseessä on siis differentiaalinen tunnistus, jonka etuna on esimerkiksi sen kyky pienentää piirissä esiintyviä häiriöitä. Kahden eri solun jännitettä vertaamalla saadaan tietää, onko kahden peräkkäisen tunnistuselektrodin kohdalla laakso-harjannealue vai harjanne-laaksoalue. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu kaksi peräkkäistä laakso- tai harjanne- aluetta, jotka kumoavat toisensa, kun differentiaalista signaalia muodostetaan. Tämä ongelma voidaan kuitenkin ratkaista asettamalla kaksi vertailijaa jokaisen piirin differentiaalisen integraattorin ulostuloihin. Tällöin vertailijoiden ulostulojen yhdistelmästä saadaan tietää, onko kyseessä laakso-harjannealue ("01"), harjanne-laaksoalue ("10") vai kaksi samanlaista aluetta peräkkäin ("00"). [14]

Kuvassa 8 esitetty sensori pystyy siis hyvin poistamaan piirissä esiintyviä häiriöitä. Tämän lisäksi sensorin etuna on myös sen nopeus. Nopeusetu saavutetaan rinnakkaisella anturimatriisin solujen mittauksella. Tämä eroaa esimerkiksi kuvan 6 b kytkennästä, jossa vain yhtä solua mitataan kerrallaan. Yhtenä kytkennän etuna on myös se, että digitaalinen ulostulo saadaan tuotettua vertailijoiden avulla ilman AD-muuntimia eli analogia-digitaalimuuntimia (engl. analog-to-digital, AD). AD-muuntimet veisivät esitettyyn kytkentään verrattuna paljon enemmän tilaa. [14]

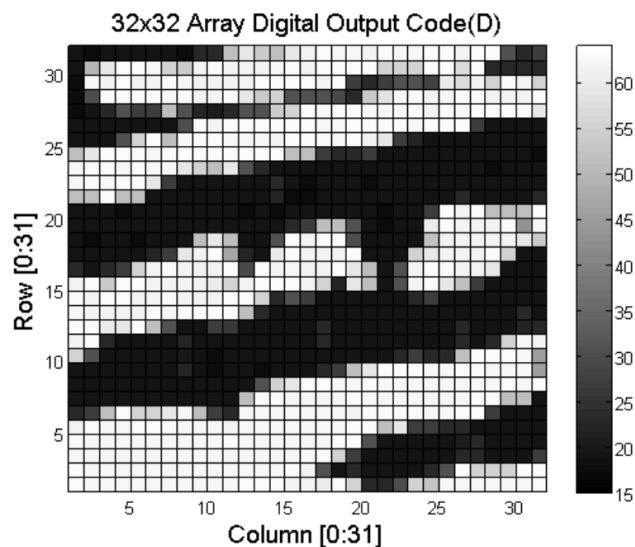
Erilaisissa tunnistuspiireissä huomataan monia yhteneviä tekijöitä. Niissä kaikissa käytetään esimerkiksi paljon MOS-transistoreita, joita ohjataan ohjaussignaaleilla. Perustoiminnallisuuden takaavien transistorien lisäksi kytkennöissä saatetaan käyttää muitakin komponentteja, joilla esimerkiksi pyritään mahdollisimman tehokkaasti pienentämään parasiittisia kapasitansseja. Suurempi määrä komponentteja kuitenkin vaatii suuremman määrän resursseja, vie enemmän tilaa ja siten maksaa enemmän. Halvimmassa kuluttajaelektronikassa tuskin pyritään kaikista häiriöttömimpään ja luotettavimpaan tunnistukseen. Kuluttajaelektronikassa varsinkin sensorin hinta ja sen koko ovat luultavasti häiriönsietoa tärkeämpiä tekijöitä. Esimerkiksi halvoissa älypuhelimissa ei välttämättä taata kuluttajalle toimivaa sormenjälkitunnistusta, jos sormi on esimerkiksi todella kuiva tai kostea, koska se hankaloittaa tunnistusta.

Viranomaisten käyttämissä tunnistimissa hinta ja koko ovat todennäköisesti luotettavuutta vähemmän oleellisia tekijöitä. Tällaisissa laitteissa voidaan siksi mahdollisesti panostaa kuluttajaelektronikkaa paremmin sormenjälkitunnistuksen luotettavuuteen. Laitteissa voidaan pyrkiä esimerkiksi mahdollisimman hyvään resoluutioon sekä laitteen toimivuuteen myös sormenpään pinnan erilaisissa olosuhteissa.

4.4 Analogisen sormenjälkidatan muuttaminen digitaalseksi sormenjälkikuvaksi

Analogista jännitettä ei itsessään voida suoraan käyttää tietokoneissa sormenjälkikuvan muodostamiseen, vaan se täytyy ensin muuttaa digitaaliseen muotoon. Muutos voidaan tehdä analogia-digitaalimuuntimella eli AD-muuntimella. Esimerkiksi sensorin, jonka solut koostuvat kuvassa 6 b esitetystä tunnistuspiiristä, elektrodimatriisin solujen analogiset jännitteet muutetaan yksi kerrallaan digitaalisiksi arvoiksi 6-bittisellä AD-muuntimella [3]. AD-muuntimissa bittisyys viittaa muuntimen resoluutioon eli siihen, kuinka monta eri jännitetasoa muunnin pystyy hyödyntämään muunnoksessa [5, s. 580 – 581].

Muuntimen lisäksi tarvitaan yleensä myös muita komponentteja, joiden avulla haluttu toiminnallisuus saavutetaan. Kuvan 6 b tunnistuspiirin mukaisessa sensorissa tarvitaan esimerkiksi multiplekseriä, joka osaltaan mahdollistaa elektrodimatriisin solujen valitsemisen yksi kerrallaan muunnosta varten. [3] Multiplekseri on komponentti, jota ohjataan yhdellä tai useammalla ohjaussignaalilla, joiden määrä riippuu komponentin sisäänmenojen määrästä. Ohjaussignaaleja muuttamalla jokin multiplekserin sisäänmenoista saadaan valittua sen ulostuloksi. [5, s. 415 – 416] Kuvan 6 b tunnistuspiirin mukaisessa sensorissa multiplekseriä käytetään, kun valitaan elektrodimatriisiin tietty sarake muunnosta varten [3]. Kuvassa 9 on esitetty kuvan 6 b tunnistuspiirin mukaisella sensorilla tuotettu digitaalinen sormenjälkikuva.



Kuva 9: Kuvan 6 b tunnistuspiirin mukaisella sensorilla tuotettu digitaalinen sormenjälkikuva [3].

Kuvassa 8 esitetyn tunnistuspiirin mukaisessa sensorissa ei sen sijaan tarvita AD-muunninta, koska piirissä jännitteiden vertailuun käytettävistä komparaattoreista saadaan suoraan digitaalinen ulostulo [14]. Komparaattori eli vertailija on komponentti, jonka ulostuloon saadaan suoraan 0 tai 1 sen mukaan, kumpi sisäänmenon jännitearvoista on suurempi [5, s. 585]. Saadut ulostuloarvot voidaan tallentaa muistiin ja niitä voidaan käsitellä ohjelmallisesti lopullisen sormenjälkikuvan koostamiseksi. Lopullisessa kuvassa matriisiin jokaisen solun kohdalla on digitaalinen 0 tai digitaalinen 1, joiden avulla tiedetään, onko kyseessä harjanne- vai laaksoalue. [14]

Lopullisia digitaalisia sormenjälkikuvia voidaan käyttää vertailuun tai ne voidaan säilöä muistiin myöhempää käyttöä varten. Digitaalisessa muodossa sormenjälkikuvista on hyötyä niin yleisessä tunnistuksessa, kuluttajaelektronikassa kuin lainvalvonnassakin.

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä pääasiallisena tarkoituksena oli selvittää, miten CMOS-tekniikka voidaan hyödyntää kapasitiivisissa sormenjälkitunnistimissa ja millaisista erilaisista elektronisista piireistä tällaiset sensorit koostuvat. Kirjallisuustutkimuksen myötä selvisi, että CMOS-tekniikka on oleellinen osa nykyaikaisia kapasitiivisia tunnistimia ja että CMOS-piiri vaikuttaa tunnistimen ominaisuuksiin. Tämän lisäksi havaittiin, että sensorit voidaan rakentaa erilaisia komponentteja ja piirejä hyödyntäen, mutta niiden perustoiminnallisuus ja peruskomponentit ovat hyvin samanlaisia.

Tässä työssä havaittiin, että kapasitiivinen sormenjälkisensori koostuu elektrodimatriisista, jossa metalliset tunnistuselektrodit on tuotettu suoraan CMOS-sirulle. Huomattiin myös, että ei ole olemassa yhtä ainoaa hyvää prosessia sirujen tuottamiselle, vaan kapasitiivisia sormenjälkitunnistimia voidaan valmistaa erilaisilla CMOS-prosesseilla. Yksi merkittävä vaikutus tunnistukseen on myös sirulle tuotettujen elektrodien koko ja etäisyys toisistaan, koska ne määrittävät tuotetun sormenjälkikuvan resoluution eli kuvatarkkuuden.

Elektronisen rakenteen osalta huomattiin, että kaikkia erilaisia rakenteita yhdistää MOS-transistorien käyttö ja niiden ohjaus joko yhdellä tai useammalla ohjaussignaalilla. Transistorien lisäksi sensorien tunnistuspiireissä on yleensä muitakin komponentteja, kuten esimerkiksi jänniteseuraaja tai vahvistin. Näillä komponenteilla pyritään useissa tapauksissa mitätöimään ei-toivottuja ominaisuuksia, joista yksi merkittävimmistä on piirissä syntyvät loiskapasitanssit. Elektrodien tunnistuspiirien rakenteen lisäksi eroja on myös siinä, miten analogiset jännitteet luetaan digitaaliseen muotoon. Joissakin sensoreissa kaikki matriisin solut luetaan yhtä aikaa ja toisissa taas yksi kerrallaan. Osassa sensoreista hyödynnetään AD-muuntimia analogia-digitaalimuunnokseen, kun taas toisissa AD-muuntimia ei tarvita, koska muut komponentit muodostavat suoraan digitaalisen ulostulon.

Kapasitiiviset sormenjälkisensorit ovat olleet merkittävä osa kuluttajaelektroniikan sormenjälkitunnistimia, ja tulevaisuudessa esimerkiksi juuri älypuhelinien sormenjälkitunnistusmenetelmien kehitys on luultavasti suuri motiivi kapasitiivisten sensorien kehitykselle. Kiinnostavaa on seurata, millainen kapasitiivisten sensorien määrä tulee olemaan suhteessa esimerkiksi optisiin sensoreihin erityisesti älypuhelimissa. Sen lisäksi kapasitiiviset sensorit kehittyvät luultavasti myös yhä enemmän näytön sisään integroiduiksi itsenäisten sensorien sijaan.

LÄHTEET

- [1] A. K. Jain, A. A. Ross, K. Nandakumar. Introduction to Biometrics. New York, NY: Springer US: Imprint: Springer. 2011. 311 p. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77326-1> (viitattu 10.2.2020)
- [2] S. K. Modi. Biometrics in Identity Management Concepts to Applications. Boston: Artech House. 2011. 263 p. Saatavissa: <http://web.a.ebscohost.com.libproxy.tuni.fi/ehost/detail/detail?vid=0&sid=7e24e793-bcdd-4d9c-8c5d-13b5b20559d0%40sdc-v-sessmgr02&bdata=JkF1dGhUeX-BIPWNvb2tpZSxpcCx1aWQmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3BIPXNpdGU%3d#AN=48461458&db=aci> (viitattu 10.2.2020)
- [3] M. Sheu, W. Hsu, Y. Huang. Low Parasitic Capacitance and Low-Power CMOS Capacitive Fingerprint Sensor. Journal Of Information Science And Engineering. 2010. Vol.26(2). pp. 585–595. Saatavissa: <http://web.a.ebscohost.com.libproxy.tuni.fi/ehost/detail/detail?vid=0&sid=7e24e793-bcdd-4d9c-8c5d-13b5b20559d0%40sdc-v-sessmgr02&bdata=JkF1dGhUeXBIPWNvb2tpZSxpcCx1aWQmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3BIPXNpdGU%3d#AN=48461458&db=aci> (viitattu 10.2.2020)
- [4] G. L. Marcialis, F. Roli. Fingerprint Verification by Fusion of Optical and Capacitive Sensors. Pattern Recognition Letters. 2004. Vol.25(11). pp. 1315–1322. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0167865504001011?via%3Dihub> (viitattu 15.2.2020)
- [5] N. Storey. Electronics: a Systems Approach. 3rd ed. Harlow: Pearson/Prentice Hall. 2006. 645 p.
- [6] E. Ghafar-Zadeh, M. Sawan. CMOS Capacitive Sensors for Lab-on-Chip Applications A Multidisciplinary Approach. 1st ed. Dordrecht: Springer Netherlands. 2010. 146 p. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007%2F978-90-481-3727-5> (viitattu: 25.2.2020)
- [7] L. Jiun-Chieh, H. Yung-Shih, M. S.-C Lu. A CMOS Micromachined Capacitive Sensor Array for Fingerprint Detection. IEEE Sensors Journal. 2012. Vol.12(5). pp 1004–1010. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6020720> (viitattu: 25.2.2020)
- [8] J. Nam, SM Jung, M. Lee. Design and Implementation of a Capacitive Fingerprint Sensor Circuit in CMOS Technology. Sensors And Actuators A-Physical. 2007. Vol.135(1). pp. 283–291. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0924424706004742?via%3Dihub> (viitattu: 25.2.2020)
- [9] N. Sabah. Electronics. 1st ed. CRC Press. 2017. 729 p. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1446904> (viitattu: 25.2.2020)

- [10] N. Sclater. *Electronic Technology Handbook*. McGraw-Hill. 1999. Saatavissa: <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9780070580480/chapter/chapter9> (viitattu: 4.3.2020)
- [11] K. Iniewski. *CMOS Nanoelectronics: Analog and RF VLSI Circuits*. McGraw-Hill. 2011. Saatavissa: <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9780071755658/chapter/chapter1> (viitattu: 4.3.2020)
- [12] Integrated circuit (IC). JEDEC. Saatavissa: <https://www.jedec.org/standards-documents/dictionary/terms/integrated-circuit-ic> (viitattu 30.3.2020) (viitattu: 4.3.2020)
- [13] P. Van Zant. *Microchip Fabrication*. 6th ed. McGraw-Hill. 2014. Saatavissa: <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9780071821018/chapter/chapter1#c9780071821018ch01lev1sec04> (viitattu: 7.3.2020)
- [14] H. Hassan, K. Hyung-Won. *CMOS Capacitive Fingerprint Sensor Based on Differential Sensing Circuit with Noise Cancellation*. *Sensors*. Basel, Switzerland. 2018. Vol.18(7). Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6069013/> (viitattu: 8.3.2020)
- [15] 7nm Technology. TSMC. Saatavissa: <https://www.tsmc.com/english/dedicated-Foundry/technology/7nm.htm> (viitattu 30.3.2020)
- [16] M. Nahvi, J. A. Edminister. *Schaum's Outline of Electromagnetics*. 5th ed. McGraw-Hill Education. 2019. Saatavissa: <https://www-accessengineering-library-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9781260120974/chapter/chapter8> (viitattu 5.4.2020)
- [17] R. Keim. *Introduction to Capacitive Touch Sensing*. *All About Circuits*. 2016. Saatavissa: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-capacitive-touch-sensing/> (viitattu 9.4.2020)
- [18] S. Clausen. *Advances in Biometrics: Sensors, Algorithms and Systems*. Springer London. 2008. 503 p. Saatavissa: https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/chapter/10.1007%2F978-1-84628-921-7_3#citeas (viitattu 11.4.2020)