

GCMO-memristoreilla toteutettujen ali- ja
ylipäästösuodattimien optimointi
taajuusluokittelijaa varten

Pro Gradu
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
LuK Tuomo Pihlasto
Tarkastajat:
FM Anni Antola
FT Hannu Huhtinen
Prof. Petriina Paturi

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

PIHLASTO, TUOMO GCMO-memristoreilla toteutettujen ali- ja ylipäästösuodattimien optimointi taajuusluokittelijaa varten

Pro Gradu, 55 s., 2 liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2026

Kasvavan datamäärän ja energiantarpeen ajamana tarve energiatehokkaille järjestelmille kasvaa. Yksi tapa vähentää esimerkiksi sensoreista saatua datan määrää, on käsitellä dataa analogisesti jo sensoreissa ja tätä ratkaisua kutsutaan reunalaskennaksi. Perinteisen tietokonearkkitehtuurin rajojen lähestyessä helpotusta energiatehokkuuteen on löydetty kehittämällä ihmisaivoista inspiraatiota saava neuromorfinen laskenta. Memristori on uusi komponentti, jota voidaan hyödyntää sekä analogisissa reunalaskentalaitteissa että neuromorfisissa piireissä sen energiatehokkuuden ja ohjelmoitavuuden ansiosta.

Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan ja optimoidaan GCMO-memristoreilla toteutettuja kaistanpäästösuodattimia. Kaistanpäästösuodattimilla halutaan käsitellä äänisignaaleja sensorilaitteessa käyttäen reunalaskentaa. Sensorilaitteissa on erityisen tärkeää niiden energiankulutus ja GCMO-memristorit ovat tähän erinomainen valinta. Memristoreilla saavutetaan myös kaistanpäästösuodattimien taajuusalueiden dynaaminen muokkaus hyödyntämällä memristorien ohjelmoitavuutta eri resistanssitiloihin.

GCMO-memristorit valmistettiin itse käyttäen valmistusmenetelminä laserhöyrystystä, fotolitografiaa ja elektronitykkihöyrystystä. Memristoreita mitattiin ja karakterisoitiin käyttämällä ArC ONE memristorien karakterisointialustaa ja Keithley-mittausjärjestelmää. Testauksissa hyödynnettiin myös oskilloskooppia, funktiogeneraattoria ja LCR-mittaria. Kaistanpäästösuodattimia testattiin teoreettisesti LTSpice-simulaatioilla toiminnan varmistamiseksi ja suodattimista ja ympäröivästä elektroniikasta valmistettiin fyysinen piirilevy, joka toteutettiin yhdessä Turun yliopiston Protopajan kanssa.

Opinnäytetyössä tutkittiin ja optimoitiin GCMO-memristoreiden toimintaa osana elektronisia piirejä ja erityisesti osana päästösuodattimia. Työssä huomattiin GCMO-memristoreissa kapasitanssia, jolla on vaikutus niiden käytössä osana elektronisia piirejä. Memristorin sisäisen kapasitanssin ja resistanssin myötä GCMO-memristoreilla havaittiin myös taajuusriippuvuutta, joka pitää ottaa myös huomioon päästösuodattimia suunniteltaessa.

Asiasanat: GCMO, memristori, resistiivinen kytkentä, neuromorfinen laskenta, reunalaskenta, päästösuodatin

Sisällys

Johdanto	1
1 Taustaa	2
1.1 Neuromorfinen laskenta	3
1.2 Memristorit ja resistiivinen kytkentä	3
1.3 GCMO-memristorit	6
2 Taajuusluokittelija	9
2.1 Äänisignaalit ja taajuusanalyysi	9
2.2 Analogiset suodattimet ja RC-piirit	10
3 Käytetyt menetelmät	14
3.1 Laserhöyrystys	14
3.2 Fotolitografia	16
3.3 Elektronitykkihöyrystys	17
3.4 Memristorien karakterisointilaitteistot	18
3.5 Memristorilaitteiden valmistus	19
4 Kaistanpäästösuodattimen suunnittelu	21
4.1 Ensimmäinen versio	21
4.2 Toinen versio	24
5 Kaistanpäästösuodattimien optimointi	26
5.1 Toteutus kiinteillä vastuksilla	27
5.2 Toteutus memristoreilla	29
5.2.1 Vertailu memristorien ja kiinteiden vastusten kanssa	31
5.2.2 Kytkentälevytestit	32
5.2.3 Memristorien taajuusriippuvuus	34

5.3	Ali- ja ylipäästösuodattimien karakterisointi memristorilla	36
5.3.1	Alipäästösuodatin	39
5.3.2	Ylipäästösuodatin	42
5.3.3	Memristorien pinta-alan vaikutus	42
6	Seuraavan version suunnittelu	45
6.1	Suunnitteluun vaikuttavat tulokset	46
6.2	Kaistanpäästösuodattimien seuraava versio	47
7	Yhteenveto ja johtopäätökset	50
	Viitteet	53

Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa kaistanpäästösuodatin hyödyntämällä GCMO-memristoreita ja niiden ohjelmoitavuutta piirisuunnittelussa sekä taajuusalueiden muokattavuudessa. Laitteen tarkoituksena oli luokitella sen vastaanottaman äänisignaalin eri taajuiset komponentit oikeisiin taajuusluokkiin. Kaistanpäästösuodatin toteutettiin työssä erillisenä laitteena, mutta sen on tarkoitus integroitua GCMO-memristoreilla toteutettuun synaptiseen neuroverkkoon, joka luokittelee ja tunnistaa suodatetut äänisignaalit. Kaistanpäästösuodatin toteutettiin ensin tavalisilla vastuksilla, jotta voitiin varmistaa kaistanpäästösuodattimen toiminnallisuus yksinkertaisemmalla toteutuksella.

Suunnitellun laitteen kytkentäkaaviota testattiin ensin simulaatiossa, komponenttien ja suunnitelman varmistamiseksi. Komponenttien valinnan ja kytkennän varmistuttua, kytkennästä toteutettiin fyysinen prototyyppi, jota testattiin tietokoneesta saatavilla äänisignaaleilla. Testauksissa käytettiin logaritmista taajuuspyyhkäisyä ihmiskorvan kuuloalueella ja saatua dataa tarkasteltiin oskilloskoopilla. Ensimmäisten testien perusteella prototyypistä suunniteltiin toinen paranneltu versio. Toisessa versiossa yksittäiset suodattimet ovat tarkempia, jolloin signaalit jakautuvat selkeämmin taajuuskaistoihinsa. Versiossa myös varmistettiin laitteen mittausmenetelmän visualisointi oskilloskoopilla.

Viimeisen prototyypin toiminnan varmistuttua siinä olevat vastukset korvattiin GCMO-memristoreilla. Sen jälkeen kaistanpäästösuodatinta testattiin samalla tavalla kuin aiempaa versiota ja tuloksia verrattiin toisiinsa. Luokittelijan memristoreiden resistanssien ja samalla taajuuskaistojen arvojen muokattavuutta testattiin ajamalla memristoreita eri tiloihin.

Lopuksi käytiin läpi testien tuloksia ja arvioitiin laitteen toimintaa. Pohdittiin myös seuraavia vaiheita ja parannusehdotuksia laitteelle.

1 Taustaa

Alati kasvavan datan määrä sensoreista ja datankäsittelyyn kuluvan energiantarpeen kasvu vaativat energiatehokkaampia ratkaisuja [1, 2]. Prosessoimalla suoraan sensoreista saatu data analogisesti, voidaan huomattavasti vähentää lähetettävän datan määrää ja näin myös energian käyttöä [2]. Analoginen datan käsittely voidaan toteuttaa kiinteillä komponenteilla, mutta tällöin menetetään mahdollisuus käsitteilyperusteiden muokkaamiseen. Korvaamalla kiinteitä komponentteja memristoreilla mahdollistetaan dynaaminen datan prosessointiperiaatteiden muutos, koska memristoreiden resistanssitiloja voidaan muuttaa. Datankäsittelyä lähellä datalähdettä kutsutaan reunalaskennaksi (engl. edge computing) ja erityisesti memristoreiden oletetaan soveltuvan analogisten signaalien reunalaskentaan [2].

Olemme myös saavuttamassa fyysiset rajat siinä, miten pieniä perinteisiä tietokonekomponentteja voimme tehdä ja tämä käsite tunnetaan yleisemmin Mooren lakina [1, 3]. Perinteiset tietokoneet erottelevat prosessoinnin ja muistin, jolloin dataa pitää siirtää sisäisesti edestakaisin, tuhlaten aikaa ja energiaa [3, 4]. Tämä tunnetaan yleisemmin von Neumannin pullonkaulana.

Perinteisten menetelmien ongelmia pyritään ratkaisemaan uudella teknologialla, jossa yhdistyvät biologisia prosesseja jäljittelevät keinotekoiset synapsit ja neuronit. Memristoreita voidaan hyödyntää keinotekoisien synapsien ja neuroneiden tekemiseen. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti GCMO-memristoreihin ja niiden yhdistämiseen osaksi elektronista piiriä. Memristorien ohjelmoitavilla tiloilla voidaan muokata kaistanpäästösuodattimien ominaisuuksia ja näin toteuttaa dynaamisesti muokattavan reunalaskentalaitteen. Tätä perinteisen ja uuden teknologian muodostamaa ratkaisua kutsutaan neuromorfiseksi laskennaksi.

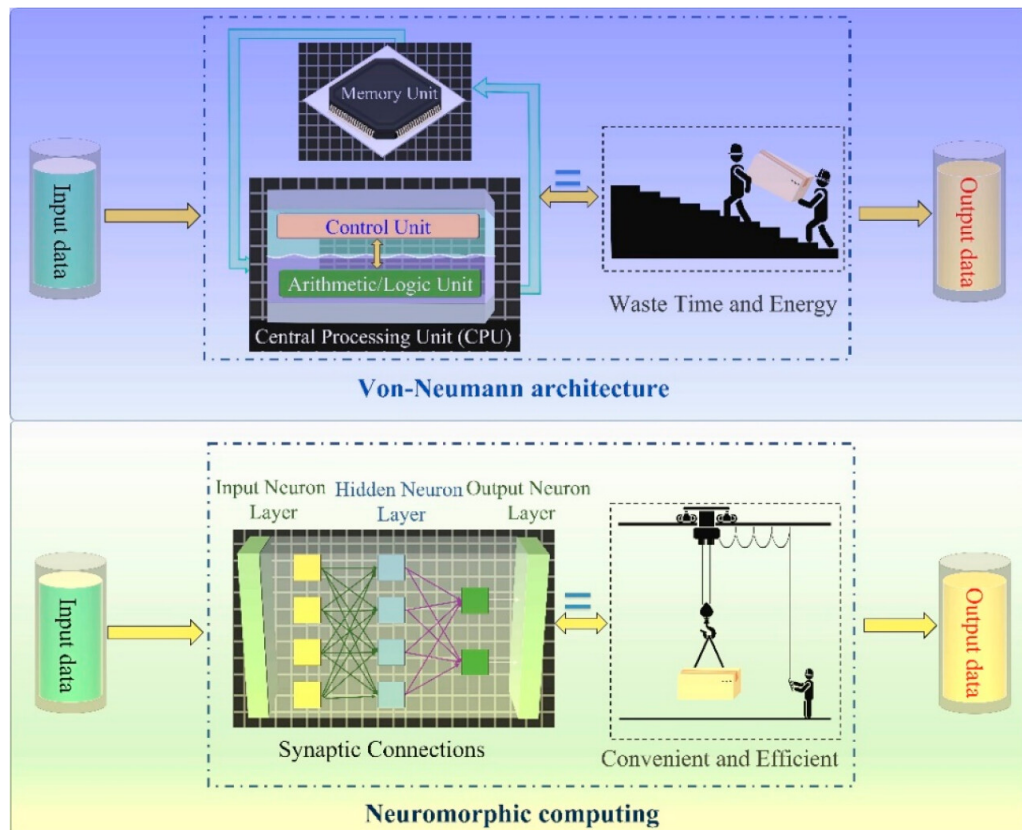
1.1 Neuromorfinen laskenta

Neuromorfinen laskenta on ihmisaivojen toiminnasta inspiraationsa saanut uusi lähestymistapa tietojenkäsittelyyn. Sen tavoitteena on luoda laitteistoja, jotka jäljittelevät aivojen neuronien ja synapsien rakennetta ja toimintaa [5]. Tavoitteena on rakentaa tehokkaampia ja energiatehokkaampia laitteita ja neuroverkkoja, jotka voittavat perinteisten tietokonearkkitehtuurien rajoitukset, joita ovat esimerkiksi prosessorin ja muistin välisen väylän rajattu kaistanleveys ja siitä johtuva viive [3, 6, 7]. Perinteisten von Neumann -arkkitehtuurien rajoituksia on onnistuttu yltämään biologisia hermoverkkoja jäljittelevillä neuromorfisilla järjestelmillä, jotka tarjoavat kompakteja ja energiatehokkaita tiedonkäsittelyominaisuuksia [4, 8]. Tällaisia neuromorfisia järjestelmiä ovat esimerkiksi hermoverkon inspiroimat tietojenkäsittelysirut [4]. Perinteisen arkkitehtuurin ja neuromorfisen laskennan eroja on esitetty kuvassa 1.

Yhdistämällä muisti ja prosessointi samaan yksikköön, nopeutetaan laskentaa ja poistetaan ylimääräinen sisäinen tiedonsiirto. Aivojen synapsien ja neuronien muodostavaa hermoverkkoa mallintamalla voidaan useita prosesseja laskea samanaikaisesti, tehden neuromorfisesta laskennasta hyvin energiatehokasta [3, 4, 6, 8]. Energiatehokkaalle neuromorfiselle laskennalle erityisen tärkeää on memristiivisten keinokehoisten synapsien ja neuronien kehittäminen [3, 10–12]. Memristoripohjaisella järjestelmällä voidaan mahdollistaa esimerkiksi energiatehokkaita reunalaskentalaitteita, reaaliaikaista diagnoosia, kuvien luokittelua ja puheentunnistusta [12].

1.2 Memristorit ja resistiivinen kytkentä

Memristori on neljäs fundamentaalinen elektroniikan komponentti vastuksen, kondensaattorin ja kelan rinnalla, joka usein muodostuu ylä- ja alaelektrodeista sekä näiden välisestä eristävästä kerroksesta [11]. Memristoreilla on pääasiassa neljä eri mekanismeihin perustuvaa toimintatapaa, jotka ovat sähkökemiallinen metallointi,



Kuva 1: Perinteisen von Neumann arkkitehtuurin rakenne ja vertaus neuromorfiseen laskentaan [9].

valenssinvaihto, termokemiallinen ja faasinmuutos [7]. Muita memristoreihin pohjautuvia mekanisme, joita käytetään erityisesti neuromorfisiin järjestelmiin perustuvissa laitteissa, ovat Mott-siirtymä, fotonin aiheuttama kytkentä ja ferrosähköinen siirtymä [7].

Sähkökemiallinen metallointi (engl. electrochemical metallization, ECM) hyödyntää metalli-ionien siirtymistä resistiivisen kytkennän saavuttamiseksi. Menetelmässä memristori on rakenteeltaan elektrodeista ja niiden välisestä eristekerroksesta muodostunut laite. Toinen elektrodi on aktiivinen ja toinen passiivinen. Annettaessa aktiiviselle elektrodille jännitettä, sen metalli-ionit siirtyvät eristekerroksen läpi passiiviselle elektrodille. Tämä siirtyminen muodostaa metalli-ioneista ohuen kuidun, jonka kautta virta kulkee ja memristorin matalan resistiivisyyden tila saavute-

taan (engl. low resistive state, LRS). Vaihtamalla annetun jännitteen polariteettia, voidaan prosessi peruuttaa, jolloin metalli-ioneista muodostunut kuitu palaa aktiiviselle elektrodille ja memristori siirtyy korkean resistiivisyyden tilaan (engl. high resistive state, HRS). Prosessi on siis bipolaarinen [7].

Valenssinvaihtoon (engl. valence change mechanism, VCM) perustuvalla resistiivisessä kytkennässä sekä memristorin rakenne että resistiivisen kytkennän toimintaperiaate ovat samankaltaiset kuin sähkökemiallisessa metalloinnissa. Erona valenssinvaihdossa on se, että jännitteellä siirretään happivakansseja metalli-ionien sijaan. Käytetyllä jännitteellä happivakanssit kulkeutuvat ja ryhmittyvät muodostaen kuituja eristekerrokseen, jotka muuttavat memristorin LRS-tilaan. Käytetyn jännitteen polariteetin vaihtuessa happivakanssien muodostama kuitu hajaantuu ja memristori palaa HRS-tilaan [7]. Valenssinvaihtoa voi tapahtua myös hapetuspelkistysreaktiona, jossa happivakanssit liikkuvat GCMO-elektrodin ja eristävän alumiinioksidikerroksen välillä, muuttaen oksidikerroksen paksuutta. Eristävän alumiinioksidikerroksen paksuus muuttaa memristorin resistanssia, ja näin saavutetaan eri resistiivisiä tiloja memristorille [7].

Termokemiallisessa (engl. thermochemical memory, TCM) prosessissa resistiivinen kytkentä perustuu myös happivakanssien siirtymiseen memristorissa. Jännitteellä on prosessissa merkitystä, mutta pääasiassa virran aiheuttama lämpö on happivakansseja siirtävä mekanismi. Termokemiallista resistiivistä kytkentää osoittava memristori on unipolaarinen, eli se voidaan asettaa matalan tai korkean resistanssin tilaan samalla jännitteen polariteetilla. Virran aiheuttama asymmetrinen lämpögradientti ohjaa happivakansseja eristekerrokseen muodostaen kuituja ja memristorin LRS-tilan. Samaan aikaan rajapinnassa happivakanssien konsentraatio aiheuttaa diffuusiota, joka työntää happivakansseja takaisin elektrodille, saaden aikaan resistiivisen kytkennän HRS-tilaan [7].

Faasimuutokseen (engl. phase change memory, PCM) perustuva resistiivinen kyt-

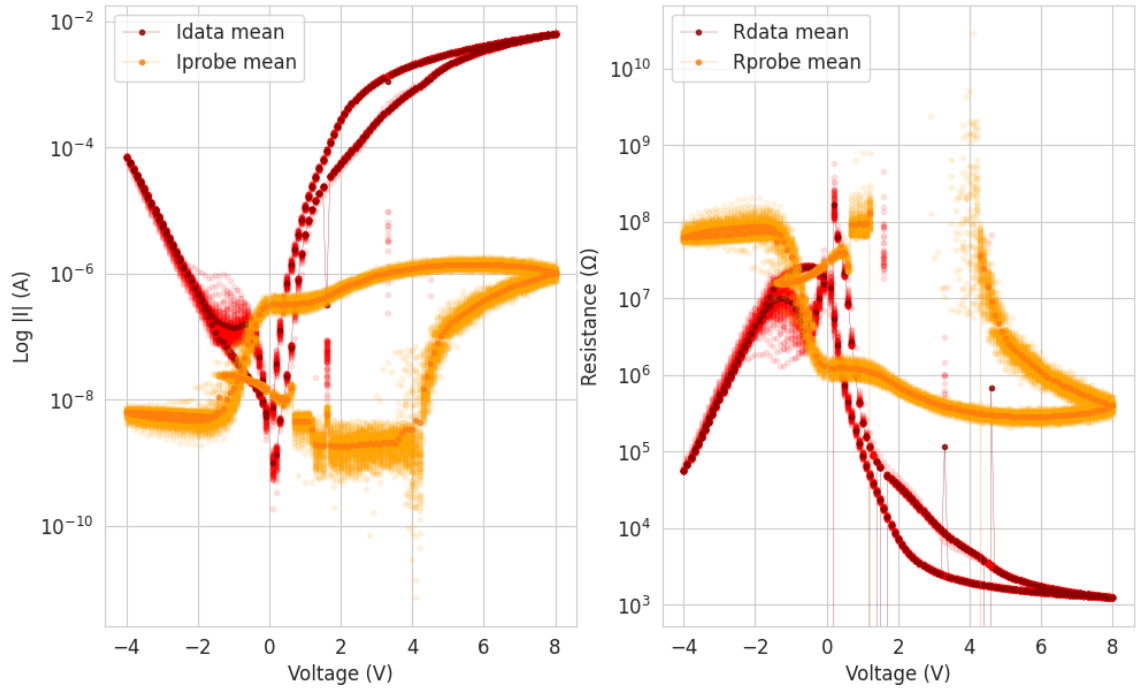
kentä syntyy materiaalin rakenteen muokattavuudesta, ionien tai vakanssien synnyttämien johtavien kuitujen sijaan. Siinä materiaali on valittu sellaiseksi, joka voi esiintyä kahdessa eri faasissa. Nämä faasit ovat järjestäytyneet kiteinen tila ja epäjärjestäytyneet amorfiset tilat. Materiaali saadaan jännitepulsseilla eri tiloihin. Jännitepulssi lämmittää hetkellisesti materiaalia niin paljon, että se sulaa, jonka jälkeen materiaali jäähtyy ja sen rakenne muuttuu jännitepulssin amplitudista ja kestoista riippuen. Korkealla ja nopealla jännitepulssilla materiaali lämpenee ja jäähtyy nopeasti, jolloin kiderakenne ei ehdi asettua ja materiaali jää amorfiseen tilaan. Amorfiset tilat ovat HRS-tila, sillä se vaikeuttaa virran kulkua materiaalissa. Matalalla ja hitaammalla jännitepulssilla materiaali jäähtyy hitaammin, jolloin rakenne ehtii asettua järjestäytyneeseen kiderakenteeseen, joka on LRS-tila helpomman virrankulun takia [7].

Yleisesti siis ulkoisessa sähkökentässä memristori käy läpi resistiivisen kytkennän ja siirtyy erittäin resistiivisestä tilasta alemman resistiivisyyden tilaan. Resistiivinen kytkentä siis muuttaa memristorin resistanssia. Korkean resistiivisyyden tilassa memristori toimii eristeenä ja matalan resistiivisyyden tilassa memristori toimii johtena. Tämä sähkökentän avulla muokattava sähkönjohtavuus muodostaa memristorin toiminnassa hyödynnettävän fysikaalisen mekanismin [13].

Tämän kytkentäkäyttäytymisen määrittävä piirre on sen ei-volatilitetti, eli tila on pysyvä. Sähköllä indusoitu johtava tai eristävä tila voi olla metastabiili siten, että materiaali säilyttää ohjelmoidun resistanssitilan myös ulkoisen sähkökentän poistamisen jälkeen. Memristoreilla voidaan tallentaa tehokkaasti tietoa resistanssitiloihin, mahdollistaen viimeisimmän tilan "muistamisen" ilman jatkuvaa virtaa [13].

1.3 GCMO-memristorit

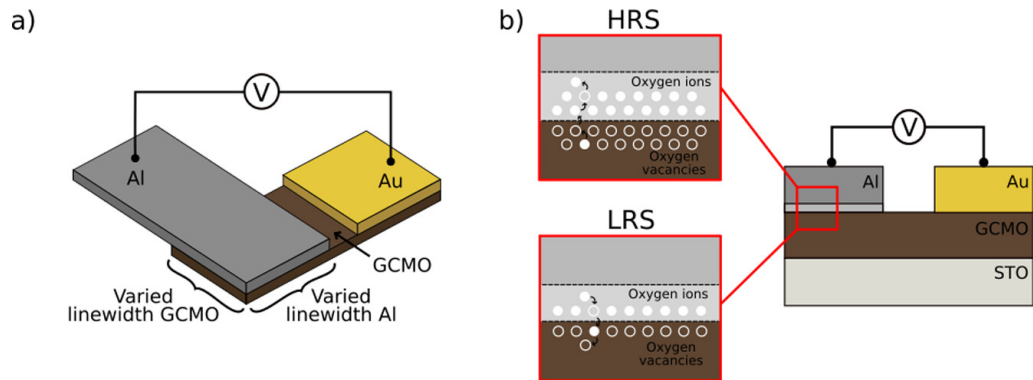
Gadoliniumkalsiummangaanioksidi, $Gd_{0.2}Ca_{0.8}MnO_3$ on perovskiitti, jota käytetään tämän opinnäytetyön memristoreissa. Sillä on rakenteensa vuoksi erityisiä sähköisiä



Kuva 2: GCMO-memristorin tyypilliset IV - ja RV -käyrät. Käyrien asymmetrisyydestä huomataan memristorin bipolaarinen käyttäytyminen.

ominaisuuksia, jotka ovat tyypillisiä perovskiiteille. Sähköiset ominaisuudet tekevät GCMO:sta lupaavan materiaalin memristiivisille laitteille. Memristorien resistiivistä kytkentää voidaan tarkastella IV - ja RV -käyrällä. Tyypilliset GCMO-memristorin bipolaariset IV - ja RV -käyrät on esitetty kuvassa 2.

GCMO-memristorin resistiivinen kytkentämekanismi perustuu valenssivaihtoon, jossa happirikkaan mangaanioksidikerroksen johtavuutta muutetaan vaikuttamalla johtavien GCMO- ja alumiiniektrodien väliseen eristävään alumiinioksidikerroksen happi-ionien konsentraatioon [14]. Materiaalina GCMO:lla on hyvin liikkuvat happivakanssit, jolloin jännitteen aiheuttamalla sähkökentällä voidaan siirtää happioneita ja happivakansseja [15]. Nämä happivakanssit liikkuvat pääasiassa passiivisen GCMO:n ja aktiivisen alumiiniektrodin välisessä alumiinioksidin muodostamassa rajapinnassa [15]. Al/GCMO-memristorissa tämä resistiivinen kytkentäprosessi kohdistuu alumiinioksidikerrokseen muodostaen aktiivisessa rajapinnassa korkean resis-



Kuva 3: GCMO-memristorin rakennekuvat (a) memristorilaitteesta ja (b) happi-ionien ja happivakanssien siirtymistä kuvaava poikkileikkaus alumiinin ja GCMO:n välisessä rajapinnassa [14].

tanssin, jota voidaan muokata valituilla jännitepulsseilla [14].

Tässä opinnäytetyössä GCMO-memristorin aktiivinen elektrodi muodostuu alumiinista ja toinen passiivinen elektrodi muodostuu GCMO:sta ja sen päällä olevasta kultakontaktista. Kontakti tehdään kullasta, jotta GCMO voidaan yhdistää alumiinilangalla ja memristoria voidaan testata. Kulta valittiin kontaktimateriaaliksi, koska sillä on johtena matala resistanssi, eikä siitä muodostu toista resistiivisen kytkennän rajapintaa, joka syntyisi, jos kontaktissa käytettäisiin alumiinia. Kuvassa 3 on esitetty GCMO-memristorin rakennekuva sekä resistiivisen kytkennän mekanismea kuvaava prosessi elektrodien välisessä rajapinnassa.

Lisäksi GCMO:lla on korkeampi bulkkiresistanssi verrattuna samankaltaiseen PCMO-memristorimateriaaliin, mikä helpottaa sen käyttöä memristorisovelluksissa, koska se auttaa tukahduttamaan ei-toivottuja vuotovirtoja korkean resistanssin tilassa. Pienempi vuoto parantaa sekä energiatehokkuutta että korkean ja matalan vastuksen tilojen välistä kontrastia [13].

Erittäin tärkeä ominaisuus GCMO:lle on, että nämä sähköiset ominaisuudet ja niistä aiheutuvat resistiiviset kytkennät voivat tapahtua huoneenlämpötilassa. GCMO:lla on kyky olla sähköisesti kytkettynä erillisten "on"- ja "off"-vastustilojen

välillä, jotka vastaavat LRS- ja HRS-tiloja. Tämä kyky yhdistettynä ohjelmoidun tilan säilymiseen, vastaa läheisesti memristorin toiminnallisia vaatimuksia [13].

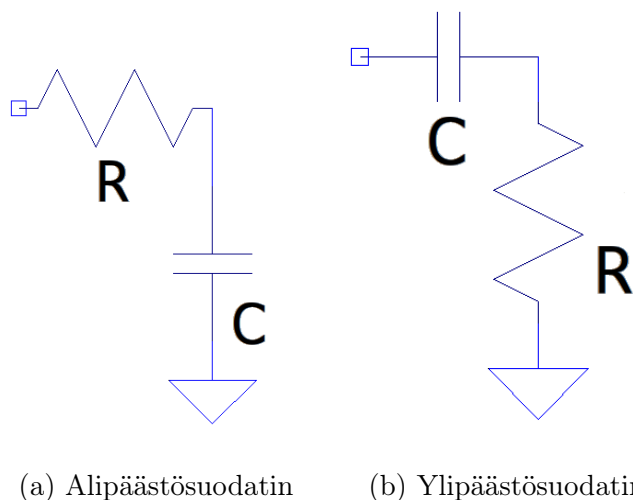
GCMO:ta voidaan soveltaa sekä synapseina että neuroneina memristori-matriisissa (engl. memristor crossbar array) [16]. Tässä työssä sovelletaan yksittäisiä GCMO-memristoreita osana kaistanpäästösuodattimia ja hyödynnetään niiden ohjelmoitavia tiloja suodattimien ominaisuuksien muokkaamisessa. Myöhemmin liitettäessä suodattimet taajuusluokittelijaan, käytetään myös GCMO:sta tehtyjä memristorimatriiseja.

2 Taajuusluokittelija

Yleisesti taajuusluokittelija on työkalu, jolla datasta voidaan erotella eri luokkiin osuvien datapisteiden määrä. Taajuudella voidaan tarkoittaa tietyn datatyypin esiintymistiheyttä tutkitussa datassa. Tässä opinnäytetyössä taajuusluokittelijalla tarkoitetaan laitetta, joka jakaa äänisignaalin eri taajuusalueet omiin luokkiinsa. Työssä keskitytään tarkemmin ihmisen kuuloalueella tapahtuvan äänisignaalin luokitteluun.

2.1 Äänisignaalit ja taajuusanalyysi

Äänisignaalien automaattinen luokittelu on tärkeää, koska ympäristöissä on valtavasti erilaisia ääniä. Luokitteluun tarvitaan laitteita, jotka voivat automaattisesti tunnistaa piirteitä äänisignaalista ja antaa tietoa mahdollisesta äänen aiheuttajasta. Onnistuneen luokittelun avain on oikeiden piirteiden valitseminen ja erottaminen äänisignaalista. Nämä piirteet ovat mitattavia ominaisuuksia, jotka auttavat laitetta erottamaan eri äänityypit toisistaan [17]. Tärkein mitattava piirre tämän työn kannalta on äänisignaalin taajuus.



Kuva 4: LTSpice ohjelmalla esitetyt ensimmäisen asteen (a) alipäästösuodattimen, ja (b) ylipäästösuodattimen piirikaavio.

2.2 Analogiset suodattimet ja RC-piirit

Päästökaistat toteutetaan yhdistämällä eri kaistanpäästösuodattimia (engl. band pass filter, BPF) rinnakkain. Kaistanpäästösuodatin koostuu sarjaan kytketyistä alipäästösuodattimista (engl. low pass filter, LPF) ja ylipäästösuodattimista (engl. high pass filter, HPF) [18]. Ensimmäisen asteen ali- ja ylipäästösuodattimista esitetyt piirikaaviot ovat kuvassa 4.

Yksittäinen suodatin koostuu passiivisista komponenteista ja reaktiivisista komponenteista. Suodattimessa voidaan käyttää reaktiivisena komponenttina kondensaattoria ja/tai käämiä [18–20]. Passiiviseksi komponentiksi sopii vastus tai memristori. Reaktiivisten komponenttien lukumäärä suodattimessa määrää kyseisen suodattimen asteen (engl. order) [18–20]. Korkeamman asteen kaistanpäästösuodattimet vaimentavat signaalia tehokkaammin taajuusalueen katkaisukohdan jälkeen [18–20]. Tässä työssä suodattimen reaktiiviseksi komponentiksi valittiin kondensaattori.

RC-piirin taajuussuodatuksen toiminta perustuu piirissä olevan kondensaattorin kapasitiiviseen reaktanssiin ja sen yhteyteen piirissä olevan signaalin taajuuteen.

Kapasitiivista reaktanssia voidaan mitata ohmeissa. Signaalin taajuuden ja kapasitiivisen reaktanssin välinen suhde on käänteinen. Kapasitiivinen reaktanssi siis laskee, kun piirin signaalilähteen taajuus kasvaa. Reaktanssi kasvaa, kun piirin signaalilähteen taajuus laskee. Pienellä taajuudella kapasitiivinen reaktanssi on suuri, jolloin sarjassa oleva kondensaattori heikentää matalan taajuuden signaalia, ja syntyy ylipäästösuodatin. Suurilla taajuuksilla kapasitiivinen reaktanssi on hyvin pieni, jolloin rinnan oleva kondensaattori toimii oikosulkuna ja signaali siirtyy kytkennän maahan [20–22].

Laitettaessa eri taajuusalueiden suodattimia rinnakkain samaan piiriin, saadaan aikaan eri päästökaistoja. Kaistanpäästösuodattimet pystyvät luokittelemaan saamansa äänisignaalin perusteella äänen eri taajuuksiset komponentit omiin taajuuskaistoihinsa. RC-piirin taajuusalueen katkaisukohta määritellään kaavalla

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (1)$$

missä f_c on taajuusalueen katkaisukohta, R on vastuksen tai memristorin resistanssi ja C on kondensaattorin kapasitanssi.

Kaava (1) määrittelee komponentit alipäästö- ja ylipäästösuodattimille. Komponenttien kytkentäjärjestys määrittelee sen, suodattaako kytkentä taajuudet ennen vai jälkeen tämän katkaisukohdan f_c [18]. Kaistanpäästösuodattimen taajuuskaista määritellään suodattimen taajuuskaistan alarajan katkaisupisteen f_L ja taajuuskaistan ylärajan katkaisupisteen f_H erotuksena.

Kaistanpäästösuodattimia on kahdenlaista tyyppiä, kapeakaistainen ja leveäkaistainen. Taajuuskaistan ylä- ja alarajan katkaisukohta määrittää onko kaistanpäästösuodin kapea- vai leveäkaistainen. Leveäkaistainen voidaan toteuttaa sarjaan kytketyillä ali- ja ylipäästösuodattimilla, joita voidaan käsitellä erillisinä komponentteina. Jos taajuuskaistan ylä- ja alarajan katkaisukohtien suhde on noin kaksi (oktaavi) tai alle, kaistanpäästösuodatinta ei voi toteuttaa sarjaan kytketyillä ali- ja ylipäästösuodattimilla, koska tällöin kaistan keskitaajuuksilla tapahtuu myös signaalin vai-

mennusta [23].

Resonanssitaajuudella f_r signaalin ulostulo saa maksimiarvonsa kyseisellä taajuuskaistalla. Resonanssitaajuus on taajuuskaistan geometrinen keskiarvo, joka lasketaan kaavalla

$$f_r = \sqrt{f_L \cdot f_H}, \quad (2)$$

missä f_r on taajuuskaistan resonanssitaajuus, f_L on taajuuskaistan alarajan katkaisupiste ja f_H on taajuuskaistan ylärajan katkaisupiste.

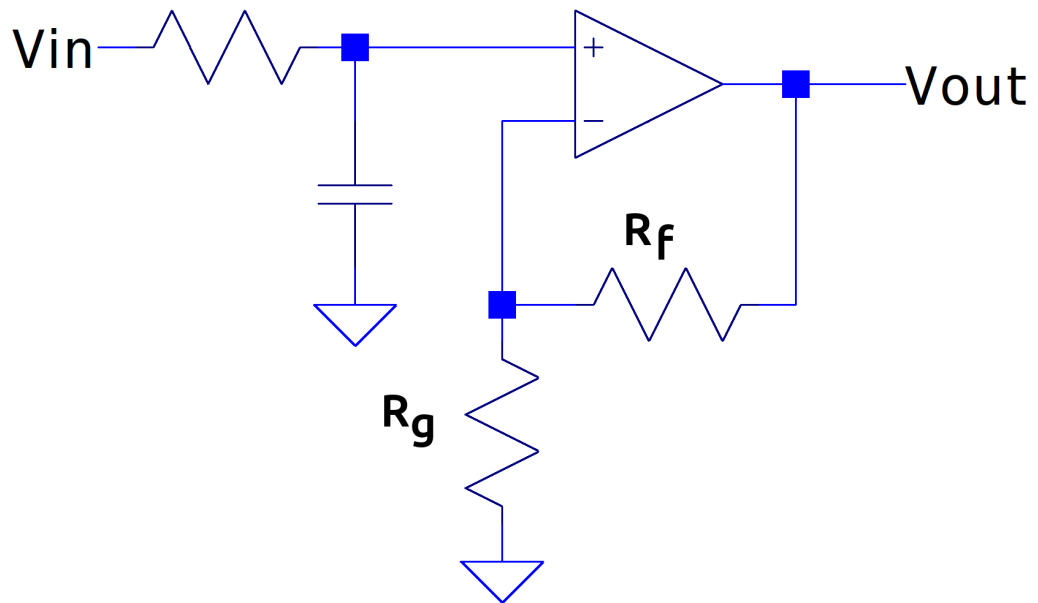
Ideaalinen kaistanpäästösuodatin päästäisi läpi vain ne taajuudet, jotka kuuluvat suodattimen taajuuskaistaan, ja vaimentaisi sen ulkopuolelle jäävät taajuudet täysin [24]. Todellisuudessa signaalin heikkeneminen eli taajuuden suodattuminen tapahtuu asteittain logaritmisesti desibeleinä seuraavan kaavan mukaisesti

$$\text{dB} = 20n \log_{10} \frac{V_{\text{Out}}}{V_{\text{In}}}, \quad (3)$$

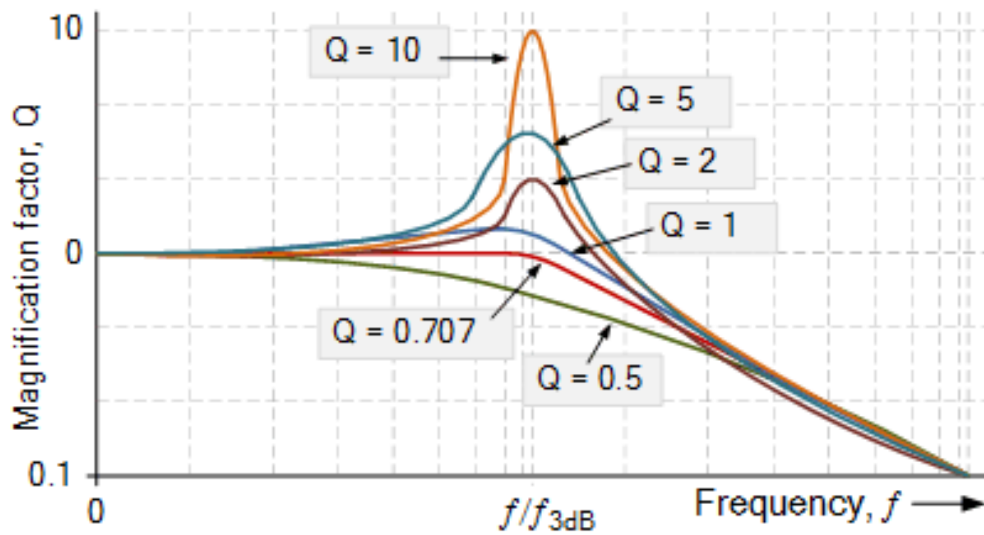
missä n on suodattimen aste, joka kertoo yksittäisen suodattimen reaktiivisten komponenttien määrän, V_{Out} on kaistanpäästösuodattimen jälkeen saadun signaalin jännite ja V_{In} on signaalin jännite, kun se saapuu kaistanpäästösuodattimelle. Katkaisukohdassa f_c signaali on heikentynyt jo arvoon $-3n$ dB ja jatkaa heikentymistään kaavan (3) mukaisesti $-20n$ dB per dekadai ($-6n$ dB per oktaavi), taajuuden siirtymässä kauemmaksi suodattimen taajuuskaistasta.

Suodattimessa voidaan käyttää operaatiovahvistimia, joilla suodatettua signaalia voidaan vahvistaa. Operaatiovahvistimet myös muodostavat puskurin taajuuskaistan suodattimen osien välille. Vahvistimen saama vahvistus A määritellään vastusten avulla ja se voidaan asettaa haluttuun arvoon määrittelemällä vastusten arvot seuraavan kaavan mukaisesti

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_g}, \quad (4)$$



Kuva 5: Alipäästösuodatin ja vahvistin takaisinkytketyllä vastuksella R_f ja maahan kytketyllä vastuksella R_g . Kaavio on piirretty LTSpice-ohjelmalla.



Kuva 6: Suodattimen suurennuskertoimen vaikutus taajuusvasteeseen suodattimen katkaisukohdassa [20].

jossa A on vahvistimen jännitteen vahvistus, R_f on takaisinkytketyn vastuksen resistanssi ja R_g on maahan kytketyn vastuksen resistanssi. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaisen alipäästösuodattimen vahvistin, sekä R_f ja R_g vastusten havainnollistava kuva. Vahvistimen vahvistus A vaikuttaa suodattimen taajuusvasteeseen erityisesti taajuuskaistojen katkaisukohtissa. Suodattimen suurennoskerroin Q lasketaan kaavalla

$$Q = \frac{1}{3 - A}, \quad (5)$$

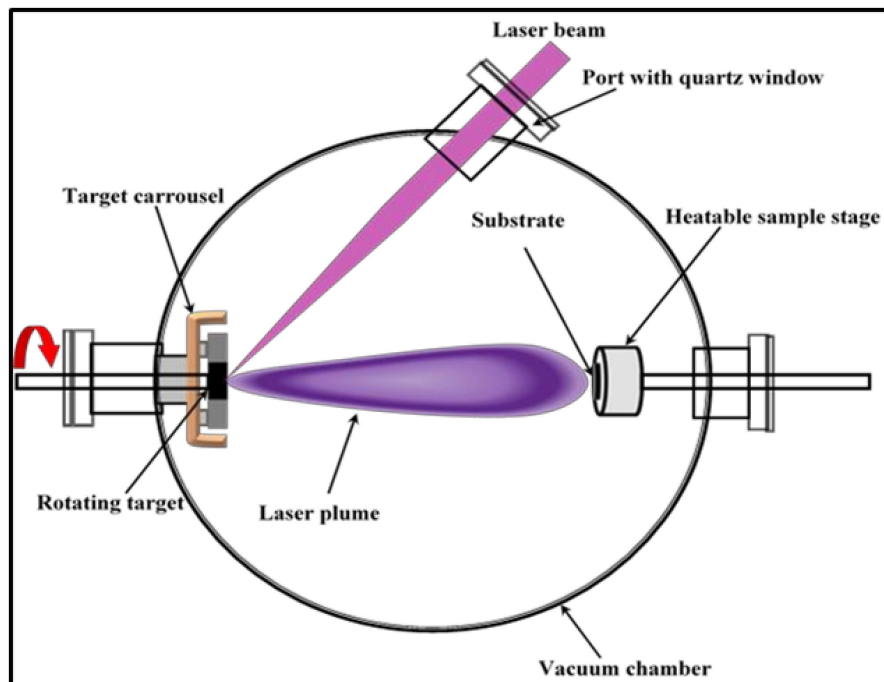
jossa Q on suurennoskerroin ja A on vahvistimen jännitteen vahvistus. Kuvassa 6 on havainnollistettu eri suurennoskerroimien vaikutuksia taajuusvasteeseen katkaisukohtissa.

3 Käytetyt menetelmät

Tässä osiossa käydään läpi opinnäytetyössä käytettyjä menetelmiä. Käytetyt menetelmät liittyvät memristorien valmistukseen Wihurin fysiikantutkimuslaboratorion tiloissa sekä memristorien ja päästösuodattimien karakterisointiin.

3.1 Laserhöyrystys

Laserhöyrystystä (engl. pulsed laser deposition, PLD) käytetään tässä opinnäytetyössä GCMO-ohutkalvojen kasvattamiseen STO-substraatille. Laserhöyrystin koostuu tyhjiökammioista, laserista, kohtiopidikkeestä, substraatin pidikkeestä ja lämmittimestä. Kuvassa 7 on esitetty laserhöyrystimen rakennekaavio. Tyhjiökammion sisällä on kohtiopidike ja substraatin pidike. Tyhjiökammiolla kontrolloidaan laserhöyrystyksessä tarvittavaa prosessiympäristöä. Tyhjiön käyttö on ehdotonta, jotta ohutkalvo ei kerää kammioista epäpuhtauksia ja saavutetaan riittävän pitkä keskimääräinen vapaa matka (engl. mean free path), joka mahdollistaa materiaalin kulkemisen substraatille esteettä. Oksideja kasvattaessa tyhjiökammiossa on osapai-

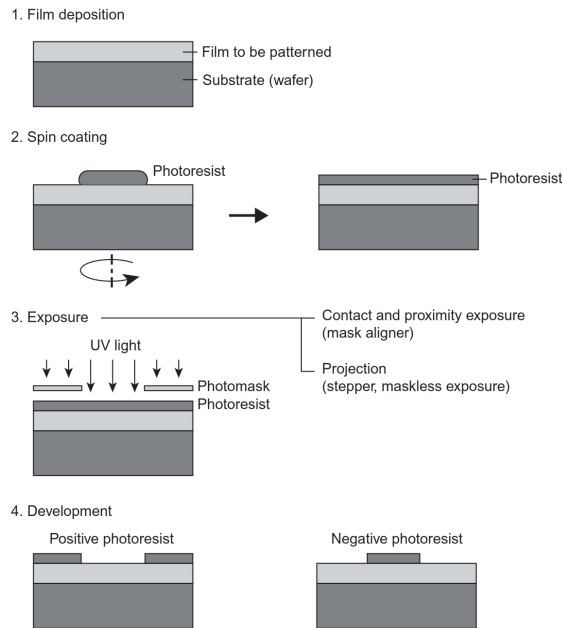


Kuva 7: Laserhöyrystimen yksinkertaistettu rakennekaavio [25].

neena happea, jotta oksidimateriaalista itsestään ei poistu happea ja kasvu pysyy stoikiometrisenä.

Laser on laserhöyrystimen energianlähde, joka sijaitsee tyhjiökammion ulkopuolella. Laserilla annetaan energiapulsseja, jotka kulkevat ikkunan kautta tyhjiökammiossa olevaan kohtiopidikkeeseen. Energiapulsseiden energia höyrystää kohtiosta materiaalia. Höyrystetty ja kohtiosta irronnut materiaali saa jatkuvista laserin energiapulsseista lisää energiaa, mikä muuttaa höyrystyneen materiaalin erittäin kuumaksi ionisoiduksi kaasuksi eli plasmopilveksi. Plasmopilvi laajenee ja kulkeutuu tyhjiökammiossa lämmitetylle substraatille, jonka pintaan materiaali kiinnittyy. Materiaali kiinnittyy kerroksittain tai saarekkeisen kasvun avulla substraatin kiderakenteeseen epitaksiaalisesti, muodostaen hyvin tasaisen ohutkalvon.

Kohtiopidikkeessä on yleensä keraamista materiaalia, jota halutaan kasvattaa substraatin päälle ohutkalvoksi. Kohtiopidike pyörii, jotta laserin energiapulsit poistavat materiaalia tasaisesti kohtiosta. Substraatin pidike on alusta, joka pitää pai-



Kuva 8: Fotolitografian prosessikaavio [27].

kallaan substraattia, jonka päälle ohutkalvo halutaan kasvattaa. Koska korkealaatuisten ohutkalvojen kasvatus vaatii korkeaa lämpötilaa, substraatin pidikkeessä on lämmitin, joka lämmittää substraatin tarvittavaan lämpötilaan [26].

3.2 Fotolitografia

Fotolitografia on menetelmä, jolla voidaan muodostaa monimutkaisia kuvioita substraatin päälle kasvaneelle ohutkalvolle. Tässä prosessissa ultraviolettivaloa käytetään siirtämään geometrinen kuvio valoherkälle ohutkalvon päälle levitetylle fotoresistille. Kuviollinen fotoresisti toimii väliaikaisena peittävänä kerroksena, joka mahdollistaa substraatilla olevan materiaalin valikoivan muokkaamisen. Kuvassa 8 on esitetty fotolitografian prosessin eteneminen kaaviokuvana.

Ensin ohutkalvo päällystetään tasaisella ohuella fotoresistikalvolla, yleensä spinpinnoituksella (engl. spin coating). Seuraavaksi fotoresistillä päällystetty näyte altistetaan UV-säteilylle suoran laserkirjoittajan (engl. direct laser writer) avulla siten, että valoa saavat vain alueet, jotka on määritelty laitteelle annettussa kuviointitie-

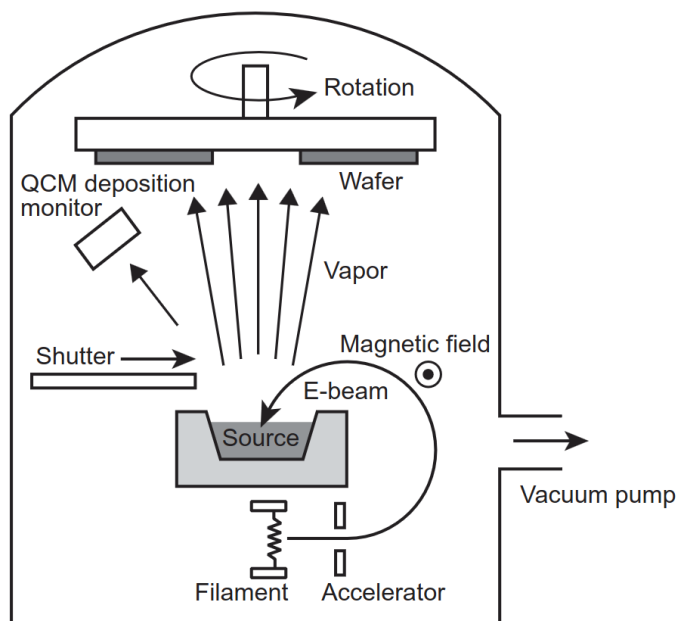
dostossa. UV-altistus saa aikaan muutoksen pinnoitteen kemiassa, muuttaen sen liukoisuutta kehittäjäliuokseen. Altistuksen jälkeen näyte kehitetään, jolloin joko valotetut tai valottamattomat alueet liukenevat riippuen siitä, käytetäänkö positiivista vai negatiivista fotoresistiä, jolloin ohutkalvolle syntyy fotoresistipinnoitteen geometriaa jäljittelevä kuvio.

Kehityksen jälkeen kuviollinen fotoresisti toimii syövytys-maskina myöhempien kuvionsiirtovaiheiden aikana. Lopuksi jäljelle jäänyt fotoresisti poistetaan sopivalta liuottimella tai plasmakäsittelyllä, jolloin haluttu kuviollinen rakenne jää ohutkalvoon. Prosessi mahdollistaa monimutkaisten mikromittakaavan ominaisuuksien luotettavan ja toistettavan valmistuksen tarkalla mittaohjauksella [28].

3.3 Elektronitykkihöyrystys

Elektronitykkihöyrystys (E-beam, engl. electron-beam evaporation) on menetelmä, jossa korkeaenergistä elektronisuihkua käytetään materiaalin höyrystämiseen. Näin siirretään esimerkiksi metalleja tai oksideja tyhjiössä substraatille. Menetelmällä saavutetaan hyvin puhtaita ja tiheitä ohutkalvoja. Prosessin eri parametreja voidaan muokata tarkasti ja näin mahdollistetaan erittäin herkkä höyrystysnopeuden ja ohutkalvon paksuuden hallinta. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaistettu rakennekaavio elektronitykkihöyrystimestä.

Prosessi alkaa, kun substraatti on asetettu tyhjiökammioon ja ennalta määritellyt ohjelma aloitetaan. Korkeaenerginen elektronisuihku synnytetään lämmittämällä korkealla jännitteellä anodihehkulankaa, jonka lämmetessä se vapauttaa elektroneja. Nämä elektronit kiihdytetään ja ohjataan sähkökentällä höyrystettävään vesijäähdytetyssä upokkaassa olevaan materiaaliin. Materiaaliin osuvien elektronien kineettinen energia muuttuu aineen lämpöenergiaksi ja aine höyrystyy, muodostaen höyrypilven. Tuloksena oleva höyryvuo etenee tyhjiössä ja tiivistyy myöhemmin kohdealustalle muodostaen ohutkalvon. Tyhjiön käyttö on välttämätöntä sekä saastumisen



Kuva 9: Elektronitykkihöyrystimen yksinkertaistettu rakennekaavio [27].

minimoimiseksi että riittävän pitkän keskimääräisen vapaan reitin aikaansaamiseksi, jotta höyrystynyt aine voi kulkeutua lähteestä substraattiin mahdollisimman vähäisellä sironnalla. Alusta on tyypillisesti asennettu pyörivään, kupolin muotoiseen pidikkeeseen paksuuden tasaisuuden parantamiseksi koko laskeuma-alueella, ja sitä voidaan lämmittää vaikuttamaan kalvon tiheyteen, mikrorakenteeseen ja yleiseen kalvon laatuun [29].

3.4 Memristorien karakterisointilaitteistot

ArC ONE on memristorien karakterisointiin tarkoitettu kaupallinen alusta. Se on tehty erityisesti memristorilaitteiden testaukseen ja niiden sähköisten kuljetusominaisuuksien karakterisoimiseen. ArC ONE sisältää useita eri mittausmetodeja, joita käytetään memristiivisten laitteiden mittaamiseen, kuten IV - ja RV -käyrät, resistiivisen tilan lukeminen ja manuaalisten jännitepulsseiden lähettäminen. Eri mittausmetodeille on tehty omia moduuleita ArC ONE -mittausohjelmassa [30].

Keithley jännite-virtalähde-mittari eli SMU (Source Measure Unit) on laajasti

memristoreiden karakterisoimiseen käytetty laite, jolla voidaan mitata virta-jännite-käyriä. SMU on monipuolinen elektroninen instrumentti, joka yhdistää tarkan virtalähteen, digitaalisen yleismittarin ja kuormituslähteen yhdeksi yksiköksi. Keithley-laitteeseen voidaan yhdistää eri testattavia laitteita, kuten memristoreita, puolijoh-teita ja perovskititeja. Keithley SMU voidaan yhdistää tietokoneeseen ja sitä voidaan kontrolloida komennoilla, jolloin on mahdollista tehdä esimerkiksi Python-koodeja, jotka suorittavat toiminnallisuuksia laitteella. Näin voidaan yhdellä laitteella sekä tuottaa että mitata jännitettä ja virtaa, mikä mahdollistaa testiasennuksen suora-viivaisen konfiguroinnin [31].

3.5 Memristorilaitteiden valmistus

Puhdastyötilassa valmistettiin kaistanpäästösuodattimien toisen version memristo-rien GCMO-kuviot. Kloe-piirto-ohjelmalla suunniteltiin memristorit $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ kokoisille näytteille. Suunnitellut memristorit olivat kokoluokaltaan $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, mikä tarkoittaa, että GCMO:n ja alumiinin muodostama päällekkäinen pinta-ala on $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$. Näytteitä oli kaksi, koska kaistanpäästösuodattimien toisessa versiossa memristorit ovat kahdella erillisellä palakotelolla. Kumpaankin näyttee-seen pyrittiin tekemään mahdollisimman monta memristoria, jotta varmemmin löy-tyisi samalla tavalla toimivia memristoreita. Näytteissä oli STO-substraatin pääl-lä GCMO-ohutkalvo, josta fotolitografiaa hyödyntäen kuvioitiin memristoreita var-ten sopivat GCMO-kuviot. GCMO-ohutkalvo oli kasvatettu STO-substraatin päälle käyttäen laboratoriossa olevaa laserhöyrystintä.

Memristorien tarvitsemat GCMO-elektrodit kuvioitiin fotolitografialla. Näytteet puhdistettiin asetonilla, minkä jälkeen niiden pinnalle levitettiin positiivinen fotore-sisti spin-pinnoitus-laitteella ja resisti esikövetettiin lämpöalustalla. Tämän jälkeen näytteet valotettiin laser-valotusjärjestelmällä käyttäen Kloe-ohjelmistossa laadittua kuviotiedostoa. Valotetut fotoresistialueet poistettiin kehiteliuoksella, jolloin kuvion

ulkopuoliset GCMO-alueiden pinnat paljastuivat. Paljastunut GCMO poistettiin kemiallisella liuoksella, minkä jälkeen jäljelle jäänyt fotoresisti poistettiin asetonilla. Prosessin tuloksena näytteisiin jäi memristoreita varten suunnitellut GCMO-liuskat. Kuvioiden muodostuminen varmistettiin sekä silmämääräisesti että mikroskoopilla, ja kuviointi onnistui suunnitellusti.

GCMO-kuvioinnin jälkeen näytteisiin valmistettiin metallikontaktit lift-off -menetelmällä kahdessa vaiheessa. Kultakontaktien tekeminen aloitettiin valmistamalla näytteisiin fotoresistikerros, jolla kultakontaktit saadaan haluttuihin kohtiin. Kontaktialueet määriteltiin valottamalla fotoresistiä laserilla ja kehittämällä valotetut alueet auki. Tämän jälkeen näytteet asetettiin E-beam-laitteeseen ja ne päällystettiin 150 nm:n kultakerroksella E-beam-höyrystyksellä. Lopuksi fotoresisti liuotettiin asetonilla, jolloin resistin päällä ollut kulta irtosi ja kultapinnoite jäi ainoastaan kontaktialueille.

Alumiinikontaktien kohdalla prosessi aloitettiin vastaavasti fotoresistin valotuksella ja kehityksellä. Ennen alumiinin höyrystystä näytteiden pinnat puhdistettiin argonplasmalla nano-etcherissä kontaktin laadun parantamiseksi. Alumiini höyrystettiin E-beamilla tavoitepaksuuteen 150 nm, mutta toteutunut paksuus oli 47 nm. Paksuusero arvioitiin hyväksyttäväksi, mutta sen arvioitiin mahdollisesti vaikuttavan sähköisiin mittaustuloksiin. Prosessin jälkeen suoritettiin lift-off asetonilla, jolloin ylimääräinen alumiini poistui kehittämättömän fotoresistin mukana ja alumiinikontaktit jäivät näytteisiin. Näytteet olivat metallikontaktien jälkeen valmiit testattavaksi.

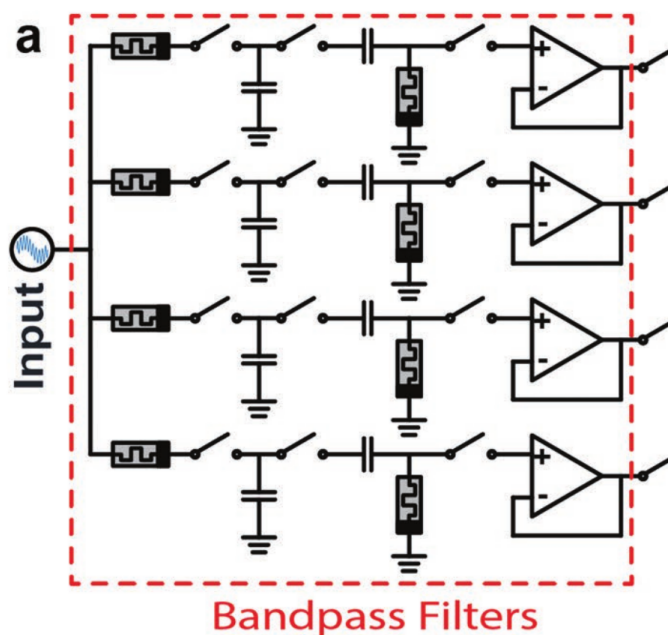
Jotta näytteitä pystyttiin testaamaan, metallikontakteihin liitettiin alumiinilangat memristorilaitteisiin ja palakoteloon. Alumiinilangat liitettiin ultraäänilankaliitimellä, joka hyödyntää korkeita taajuuksia kontaktin muodostamiseksi. Ultraäänilankaliitin käyttää korkeataajuisia mekaanista värähtelyä ja painetta muodostaakseen kontaktin näytteen pinnan ja alumiinilangan kanssa [32].

4 Kaistanpäästösuodattimen suunnittelu

Suunnittelun pohjana käytettiin tutkimusta, jossa taajuusalueen suodatin oli muodostettu ensimmäisen asteen alipäästösuodattimen ja ylipäästösuodattimen sarjaankytkennästä [21]. Kuvassa 10 on esitetty artikkelin [21] memristoreihin pohjautuvat kaistanpäästösuodattimet. GCMO-memristorin oli tarkoitus korvata ali- ja ylipäästösuodattimessa käytetyt kiinteät vastukset ja kytkennöissä oleva kondensaattori toteutettaisiin kiinteänä komponenttina. Suunnittelussa päätettiin jakaa äänialueen taajuus neljään taajuusalueeseen ja taajuusalueiden rajoiksi valittiin 1 – 20 Hz, 20 – 200 Hz, 200 – 2000 Hz ja 2000 – 20000 Hz. Rajojen perusteella määriteltiin alustavasti jokaisen yksittäisen taajuusalueen suodattimen komponenttien arvot käyttäen kaavaa (1). Laitteisto suunniteltiin ensin vastuksilla, joiden resistanssin arvot vastaavat niitä rajoja, joilla GCMO-memristoreiden resistanssin arvoja voidaan luotettavasti toteuttaa. Memristorien resistanssien rajat arvioitiin aiempaan tutkimukseen perustuen. Resistanssin arvot olivat hyvin suuria, noin $10^6 - 10^9 \Omega$. Päätettyjen taajuusalueiden rajojen ja mahdollisten memristorien resistanssien rajojen avulla määriteltiin suodattimien kiinteille kondensaattoreille sopivat arvot. Kondensaattorien ja taajuusalueiden rajojen arvoilla edelleen määriteltiin memristoreja vastaavien vastusten arvot. Määritellyillä arvoilla testattiin eri kytkentäkaavioilla kaistanpäästösuodattimien toimintaa.

4.1 Ensimmäinen versio

Ensimmäisten kaistanpäästösuodattimien piirilevy suunniteltiin ja valmistettiin itse, kun kaistanpäästösuodattimista oli suoritettu yksinkertaisia piirisimulaatioita. Kuvassa 11 on esitetty ensimmäisen asteen kaistanpäästösuodattimien teoreettinen taajuusvaste. Versiota testattiin ensin kiinteillä vastuksilla päästösuodattimien toiminnan varmistamiseksi. Kaistanpäästösuodattimet suunniteltiin hyödyntämään Arduinoa, jolloin sitä voitaisiin mahdollisesti käyttää virtalähteenä, taajuusvasteiden mit-

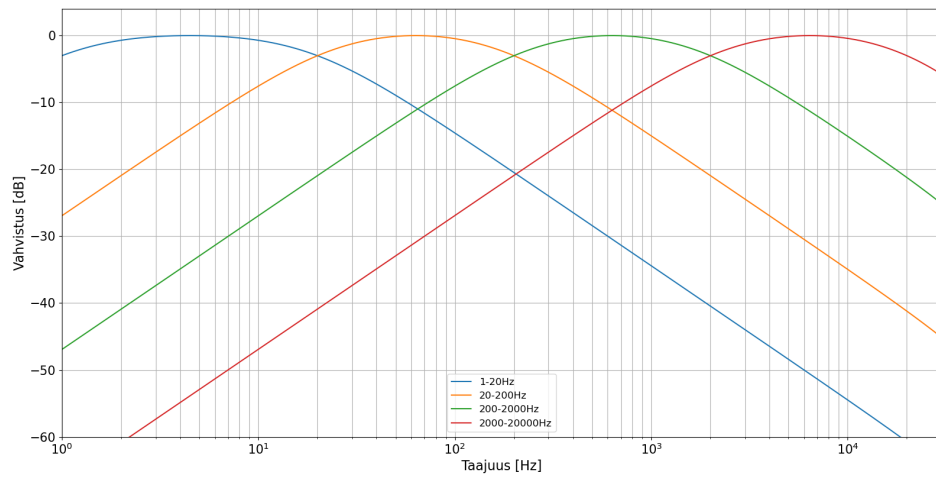


Kuva 10: Memristoreilla toteutetut kaistanpäästösuodattimet [21].

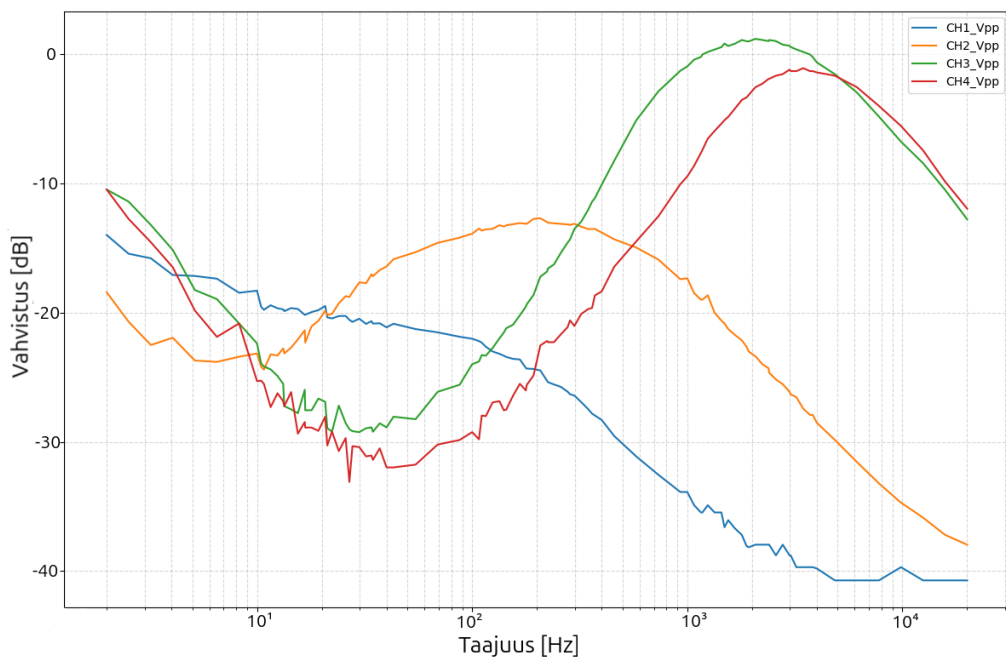
taamiseen ja esittämiseen. Taajuusvasteita pystyttiin myös mittaamaan oskilloskoopilla. Oskilloskooppi on mittalaite, joka visualisoi jännitesignaalin ajan funktiona laitteen näytölle. Sillä voidaan esittää taajuusvasteet aaltomuotona ja tarkastella niitä reaaliajassa.

Taajuuluokittelijan ensimmäisistä testeistä huomattiin nopeasti, että saatu data oli merkittävästi virheellistä. Kävi ilmi, että Arduino ei sovellu taajuusvasteen mittaamiseen mittauksessa käytetyn AC signaalin takia. Arduinoa varten tehdyt muutokset piiriin haittasivat myös sisääntulevan signaalin vahvuutta. Virtalähteenä Arduinosta saatu jännite oli liian matala, joten se ei soveltunut piirissä olevien operaatiovahvistimien käyttöjännitteeksi.

Verrattaessa kuvan 11 teoreettista taajuusvastetta kuvan 12 mitattuun taajuusvasteeseen, havaittiin selkeitä eroavaisuuksia. Taajuusvasteissa havaittiin turhan paljon päällekkäisyyksiä viereisten taajuuskaistojen saamissa jännitteissä. Valittujen komponenttien suuruudet eivät olleet kaikille taajuuskaistoille optimaalisia, vaikka



Kuva 11: Ensimmäisen asteen suodattimien teoreettinen taajuusvaste äänialueella.



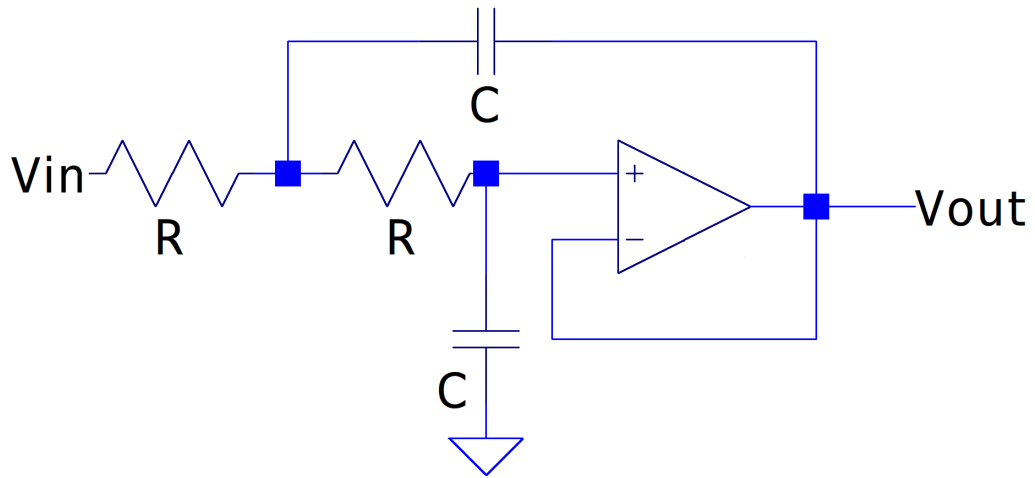
Kuva 12: Kiinteillä vastuksilla toteutetun ensimmäisen asteen kaistanpäästösuodattimien taajuusvaste äänialueella.

esimerkiksi suurimman taajuuden taajuuskaistalle ei ollut vaihtoehtoja memristorien resistanssien suurten arvojen vuoksi. Vastusten valinnoissa ei myöskään oltu otettu huomioon niitä vastaavien memristoreiden resistanssin säädettävyyttä, jotta taajuuskaistojen katkaisukohtia olisi voitu muuttaa kumpaankin suuntaan.

4.2 Toinen versio

Kaistanpäästösuodattimien toinen versio suunniteltiin toisen asteen kaistanpäästösuodattimilla, jotka vaimentavat tehokkaammin taajuusalueiden ulkopuolisia signaaleja. Toisen asteen suodatin rakennettiin lisäämällä suodattimeen toinen passiivinen ja reaktiivinen komponentti, eli tässä tapauksessa suodattimissa käytettyjen komponenttien määrä kaksinkertaistui. Komponenttien kaksinkertaistaminen myös kaksinkertaisti signaalin vaimenemisen taajuuskaistan ulkopuolella -20 dB:stä per dekadiksi -40 dB:iin per dekadiksi. Laitteen ensimmäiseen taajuuskaistaan lisättiin ylipäästösuodatin, jotta kaistan signaalin vahvistus ja katkaisukohtien tarkkuus vastaisivat muiden taajuuskaistojen tasoa. Kyseisen taajuuskaistan alarajan katkaisukohtaa pystyttiin näin tarvittaessa myös muuttamaan.

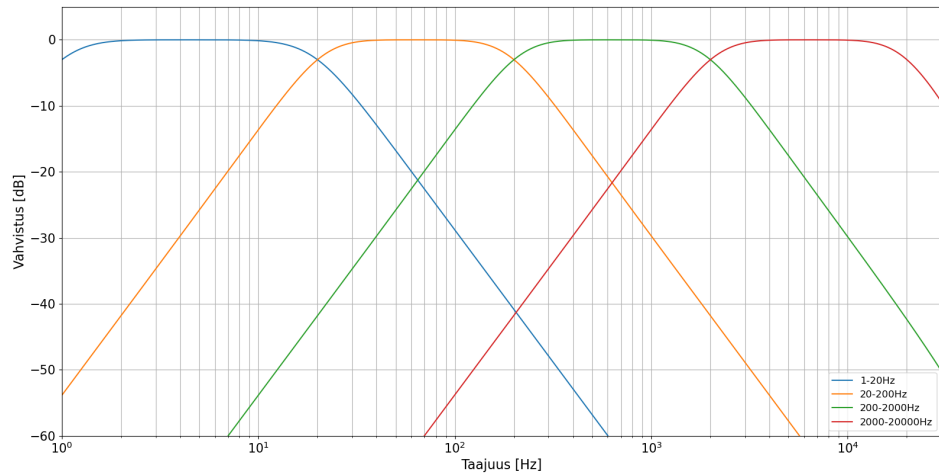
Taajuusalueiden toisen asteen suodattimissa käytettiin samoja komponenttien arvoja yksittäisissä ali- ja ylipäästösuodattimissa, jolloin taajuusalueen katkaisukohta f_c voitiin edelleen määrittää kaavalla (1). Käytettyjen vastusten resistanssien arvoja muutettiin memristoreilla mahdollisten resistanssikaistojen keskivaiheille, jotta memristoreiden resistanssia muuttamalla pystyttäisiin muuttamaan taajuuskaistojen katkaisukohtia. Versiossa käytettyjen kondensaattoreiden kapasitanssien arvoja muutettiin, jotta määritellyt taajuuskaistat pysyisivät samoina aiemman laiteversion kanssa. Kondensaattorien arvoja pyrittiin myös saamaan suuremmiksi pienempien taajuuksien suodattimissa niiden toiminnan parantamiseksi. Laitteeseen tehtiin yleisesti parannuksia, kuten tarpeeksi suuri virtalähde vahvistimille ja taajuuskaistojen mittapisteet muutettiin kiinteiksi liittimiksi, jotka voitiin yhdistää suoraan



Kuva 13: Toisen kertaluokan Sallen-Key alipäästösuodattimen kytkentäkaavio. Suodattimesta saadaan tasainen vaste eli Butterworth-suodatin, kun valitaan sama R ja C . Kaavio on piirretty LTSpice-ohjelmalla.

oskilloskooppiin liittimillä.

Versiossa taajuusalueiden suodattimet toteutettiin toisen kertaluokan Sallen-Key suodattimilla, jotka suunniteltiin Butterworth-suodattimiksi, jolloin niiden signaalin vaste on maksimaalisen tasainen. Kuvassa 13 on esitetty Sallen-Key suodattimen kytkentäkaavio alipäästösuodattimelle. Tasaisella vasteella tarkoitetaan signaalin katkaisukohtan käyttäytymistä tasaisella logaritmisella muutoksella. Suodattimien komponenttien arvoilla on mahdollista myös vahvistaa signaalin vastetta katkaisukohtassa tietyillä valinnoilla, mutta se ei ole tässä sovelluksessa haluttua. Maksimaalisen tasainen signaalin vaste saavutetaan, kun suurennoskerroin $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Näin käyttäen kaavoja (4) ja (5), voitiin määrittää operaatiovahvistimien vaatimat takaisinkytketyn vastuksen ja maahan kytketyn vastuksen suhde. Suunnitellun Sallen-Key suodattimen teoreettinen taajuusvaste on esitetty kuvassa 14. Kuvasta 14 nähdään, että taajuuskaistojen katkaisukohtat ovat pisteissä 1, 20, 200 ja 2000 Hz ja että taajuuskaistat vaimenevat -40 dB per dekadit taajuuskaistojen ulkopuolel-



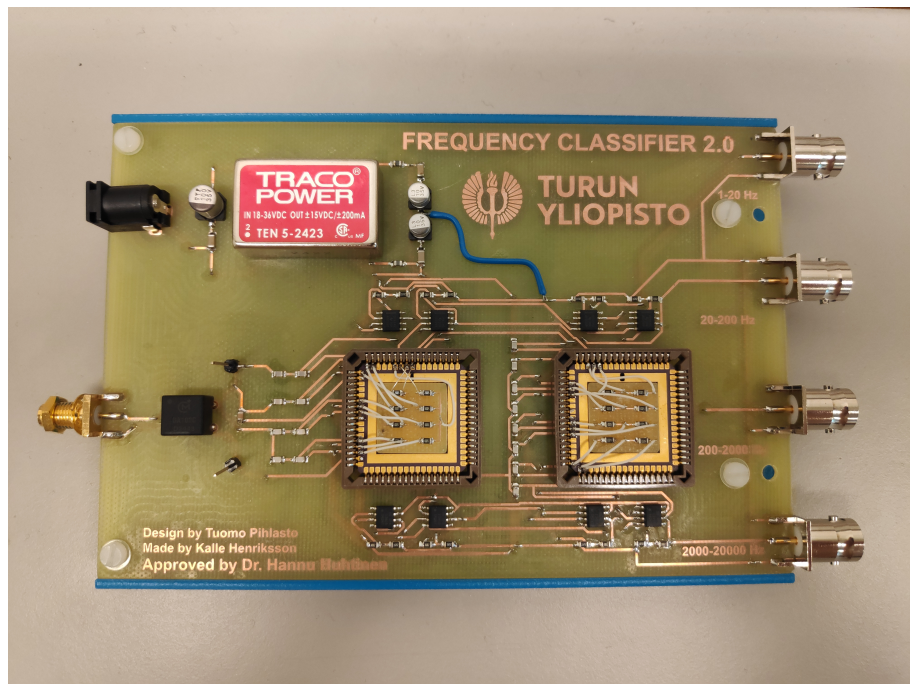
Kuva 14: Toisen asteen Sallen-Key suodattimien teoreettinen taajuusvaste äänialueella.

la. Taajuusvasteen käyttäytyminen katkaisukohtassa on Butterworth-suodattimelle tyypillinen maksimaalisen tasainen vaste.

Valmis kaistanpäästösuodattimien toinen versio näkyy kuvassa 15. Piirilevyn memristoreita kuvaavat vastukset oli asetettu siten, että ne voitiin tarvittaessa korvata GCMO-memristoreilla, jolloin samaa piirilevyä voitiin käyttää testien seuraavassa vaiheessa. GCMO-memristorit valmistettiin jatkoa varten ja niihin pyrittiin saamaan tietyt resistanssin arvot, jotta taajuusalueiden suodattimien taajuuskaistat saataisiin pysymään halutuilla alueilla.

5 Kaistanpäästösuodattimien optimointi

Kaistanpäästösuodattimia testattiin tietokoneen audiolla logaritmisella taajuuspyyhkäisyllä. Pyyhkäisyistä mitattiin taajuuksien signaaleista huipusta huippuun -arvot jokaiselle kanavalle, eli taajuuskaistoille sekä alkuperäiselle signaalille. Ääniaaltoina käytettiin Python-koodilla generoituja sinimuotoisia aaltoja, jotka yhdistettiin



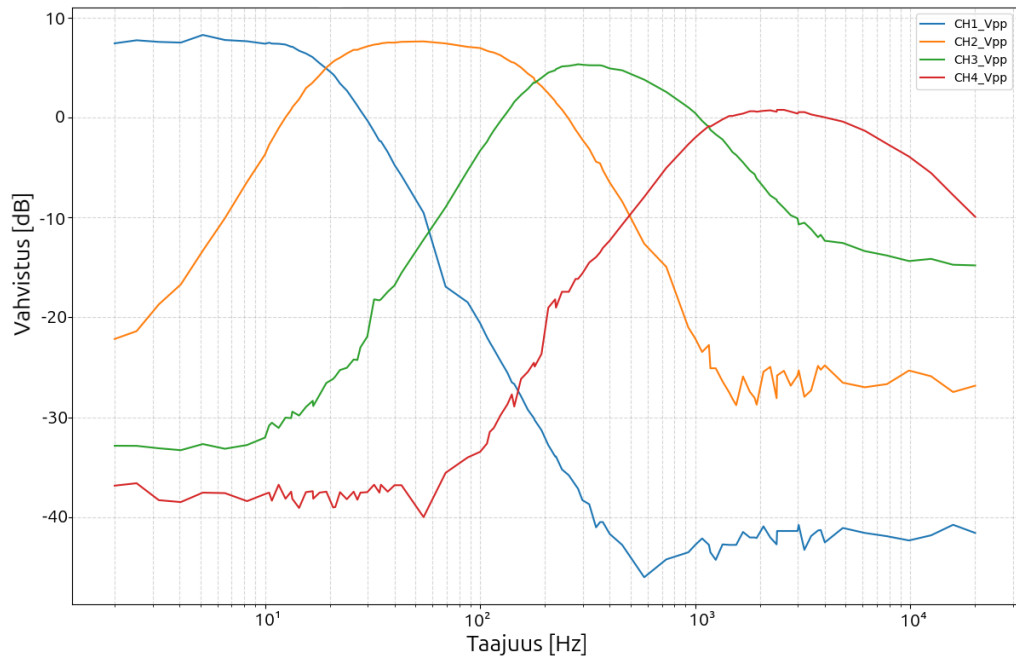
Kuva 15: Kaistanpäästösuodattimien toinen versio, jonka toteutuksessa hyödynnettiin Turun yliopiston Protopajassa Kalle Henrikssonin osaamista.

kaistanpäästösuodattimiin erillisen äänikortin kautta. Äänikorttia käytettiin, jotta signaalin amplitudi olisi mahdollisimman tasainen myös alhaisilla taajuuksilla.

Tehdyistä testeistä voidaan vertailla eroa teoreettiseen taajuusvasteeseen ja eri komponenttivalintojen välillä tapahtuvan suodatuksen muutosta. Mittaukset näkyivät oskilloskoopin ruudulta ja mittadata tallennettiin oskilloskoopista tietokoneelle mittauksen yhteydessä. Mitatuista arvoista tehtiin kaistanpäästösuodattimille tyyppillinen taajuusvaste-kuvaaja, jossa esitetään signaalien suodatusta logaritmisesti desibeleinä taajuuden funktiona. Mittaustuloksista voidaan päätellä taajuuskaistoissa tapahtuva vahvistus, vaimennus ja kaistojen katkaisukohtien paikat.

5.1 Toteutus kiinteillä vastuksilla

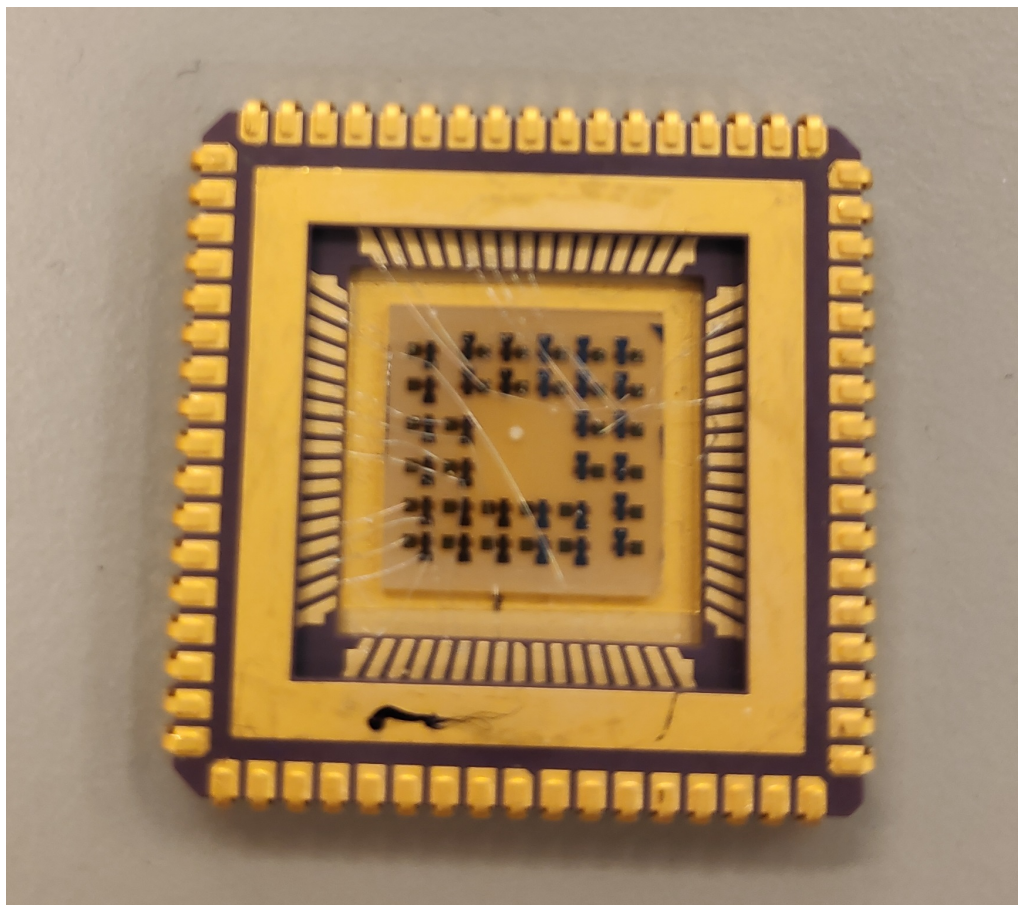
Valmiille kaistanpäästösuodattimille suoritettiin mittauksia käyttäen kiinteitä vastuksia kaistanpäästösuodattimissa. Kiinteillä vastuksilla toteutetun kaistanpäästö-



Kuva 16: Kiinteillä vastuksilla toteutettujen kaistanpäästösuodattimien taajuusvaste äänialueella.

suodattimien taajuusvaste eri taajuuskaistoille eli kanaville on esitetty kuvassa 16. Kuvassa 16 huomataan, että luokittelijasta saatu signaali vastaa muodoltaan suurilta osin kuvan 14 teoreettista taajuusvastetta. Mittatuloksista huomataan, miten laitteen taajuusvasteessa näkyy selvästi toisen asteen tuoma kaavan (3) mukainen signaalin jyrkempi vaimeneminen. Mittauksissa kanavien 3 ja 4 taajuusvasteet ovat enemmän päällekkäin kuin teoreettisessa tapauksessa.

Koska kaistanpäästösuodattimien toisessa versiossa on operaatiovahvistimia, mitatuissa vasteissa havaitaan signaalin vahvistusta, jolloin signaalin maksimi ei enää ole 0 dB. Kuvasta 16 nähdään, että signaalin huipusta huippuun -arvot pienenevät kanavissa 3 ja 4, jotka vastaavat 200 – 2000 Hz ja 2000 – 20000 Hz taajuuskaistoja. Tämä voi johtua optimoimattomista komponenttivalinnoista tai siitä, että kanavissa käytetään erilaisia operaatiovahvistimia kuin kanavissa 1 ja 2.



Kuva 17: Palakotelolla olevat valmiit memristorilaitteet ja alumiinilangat. Kuvassa näkyy myös ultraäänilankaliittimellä yhdistetyt alumiinilangat, joiden kautta memristoreita voidaan testata.

5.2 Toteutus memristoreilla

Valmistetuissa näytteissä oli 32 memristoria, ja niistä piti löytää 8 mahdollisimman samankaltaista toimivaa memristoria. Memristorit liitettiin alumiinilangalla palakotelon pinneihin, joiden kautta memristoreita voitiin lukea, testata ja asettaa eri tiloihin. Kuvassa 17 näkyvät valmiit memristorilaitteet ja alumiinilangat, joilla memristorien terminaalit muodostuvat elektrodeista. Alumiinilangat yhdistettiin memristorin päihin ja palakoteloon ultraäänilankaliittimellä.

Memristoreita luettiin ja asetettiin eri tiloihin ArC ONE -laitteella ja siihen kuu-

luvalla ohjelmalla. Useiden uudelleenkytkentöjen jälkeen huomattiin, että oli vaikeaa löytää toimivia memristoreita. Tästä syystä alettiin epäillä ArC ONE Memristor Characterization Program -ohjelmaa, ja memristorit luettiin käyttäen Keithley-laitetta ja siihen tehtyjä Python-koodilla toimivia komentoja. Keithleyä käytettäessä memristorit, jotka eivät aiemmin ArC ONE -laitteella näyttäneet toimivilta, näyttivät nyt toimivan memristorien merkkejä, kuten aukeamia niiden IV -käyrissä.

Memristorissa alumiiniohutkalvo ja GCMO-ohutkalvo muodostavat memristorin elektrodit, joiden kautta laitteeseen voidaan asettaa ja lukea tiloja. Memristoreiden eri päädyt kytkettiin laitteessa bitline- ja wordline-pinneihin. Nämä pinnit pystyvät kontrolloimaan kyseistä memristoria ohjelman kautta.

Memristorin tila luetaan lyhyellä ja heikolla jännitepulsilla ohjelman kautta. Jännitepulssit ovat millisekuntien luokkaa, ja tässä työssä käytettiin 20 ms:n pulssia. Tilan lukevan jännitepulssin pitää olla heikko, jotta se ei muuttaisi memristorille asetettua tilaa. Kyseisillä memristoreilla käytettiin 0,4 V:n lukujännitettä.

Memristorien asettaminen eri tiloihin tapahtuu pulssittamalla memristoria suuremmilla jännitteillä. Pulssittamalla memristoreita eri jännitteillä useita kertoja, voitiin memristorit saada eri resistanssitiloihin. Memristorien resistanssi pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle niitä vastaavien kiinteiden vastusten arvoja. Resistanssin asettaminen oli hankalaa, sillä resistanssi kasvaa vielä pulssitusten jälkeen, ennen kuin tilan resistanssi tasaantuu. Tämä tilan retentio on käytetyille memristoreille tunnettu ongelma [16].

Memristorien kanssa mitattaessa ne asetettiin ensin kiinteitä vastuksia vastaaviin resistansseihin. Valmistetut memristorit vaihdettiin kaistanpäästösuodattimien piiriin kiinteiden vastusten tilalle. Vaihdaminen tapahtui suoraan palakoteloiden vaihdolla piirilevyyn, jolloin piiri pysyi muuten muuttumattomana.

Mittauksissa käytettävän äänisignaalin vahvuutta oli muutettava alhaisemmaksi, koska memristoreiden tila muuttuu liian suurilla jännitteillä. Äänisignaalin jän-

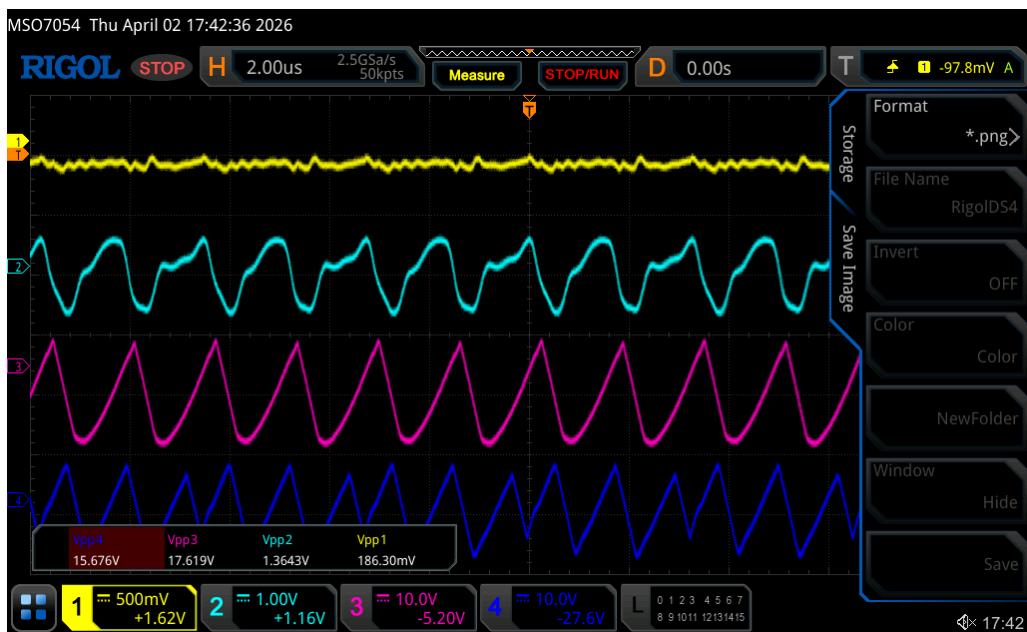
nitteen piti laskea tarpeeksi alhaiseksi, jotta ensimmäisten operaatiovahvistimien jälkeinen jännite oli vielä alle turvallisen rajan. Ensimmäisen operaatiovahvistimen jälkeinen vahvistus on noin 1,5-kertainen, joka saadaan kaavasta (4). Toinen operaatiovahvistin vahvistaa signaalin vasta, kun se on ohittanut toiset memristorit siinä taajuuskaistassa, joten toinen signaalin vahvistus ei vaikuta memristorien tilaan. Mitattavien signaalien jännitteet tarkastettiin oskilloskoopilla ja yleismittarilla.

5.2.1 Vertailu memristorien ja kiinteiden vastusten kanssa

Mitattuja tuloksia verrattiin toisiinsa ja arvioitiin, toimivatko memristorit kaistanpäästösuodattimissa kuten kiinteät vastukset. Alkuperäinen oletus oli, että GCMO-memristorit toimisivat kuten kiinteät vastukset, eikä laitteessa tarvitsisi muuttaa mitään.

Kaistanpäästösuodattimien taajuusvastetta memristoreiden kanssa tarkastellessa oskilloskoopista huomattiin, että jokaisen kanavan signaalissa on hyvin korkea-taajuinen häiriökomponentti. Häiriö oli myös jännitteeltään hyvin korkea, kuvasta 18 nähdään jopa noin 17 V huipusta-huippuun -arvolla korkeimman taajuuskaistan kanavassa. Häiriöstä erityisen oudon teki se, että se syntyi ilman erillistä laitteeseen sisääntulevaa signaalia. Laitteeseen syötettyä signaalia ja sen synnyttämää taajuusvastetta oli hyvin vaikea erottaa suuren häiriökomponentin takaa. Annetun signaalin amplitudin piti olla alhainen, jotta se ei itsessään ylikirjoittaisi memristoreiden tiloja uudelleen.

Häiriön ajateltiin ensin tulevan pistorasiasta, koska se oli aiheuttanut välillä ongelmia myös kiinteiden vastusten kanssa. Häiriön poistamiseksi laitteeseen piti toteuttaa toinen käyttöjännitelähde. Kaistanpäästösuodattimia varten tehtiin nopeasti oma akku, josta laite sai käyttöjännitteen tämän häiriön syyn varmentamiseksi tai poissulkemiseksi. Akun avulla todettiin, että häiriön lähde on jossain muualla kuin verkkovirrassa, koska häiriö pysyi muuttumattomana myös akulla. Koska ongelma



Kuva 18: Kaistanpäästösuodattimien kanavien häiriöt memristoreilla. Signaalit on esitetty oskilloskoopin näytöltä.

selkeästi syntyi memristoreista, oli kytkentää yksinkertaistettava, jotta pystyttäisiin selvittämään ongelman juurisyy ja ymmärtämään memristorien ominaisuuksia piirissä paremmin.

5.2.2 Kytkentälevytestit

GCMO-memristoreita testattiin yksinkertaisimmalla RC-suodatin -kytkennällä, koska ne eivät toimineet kaistanpäästösuodattimissa kuten kiinteät vastukset. Yksinkertaisimmalla RC-suodattimella tarkoitetaan ensimmäisen asteen passiivista alitai ylipäästösuodinta. Passiivisessa suodattimessa ei ole operaatiovahvistinta, jolloin suodattimen läpäisseen signaalin suurin vahvistus on 0 dB.

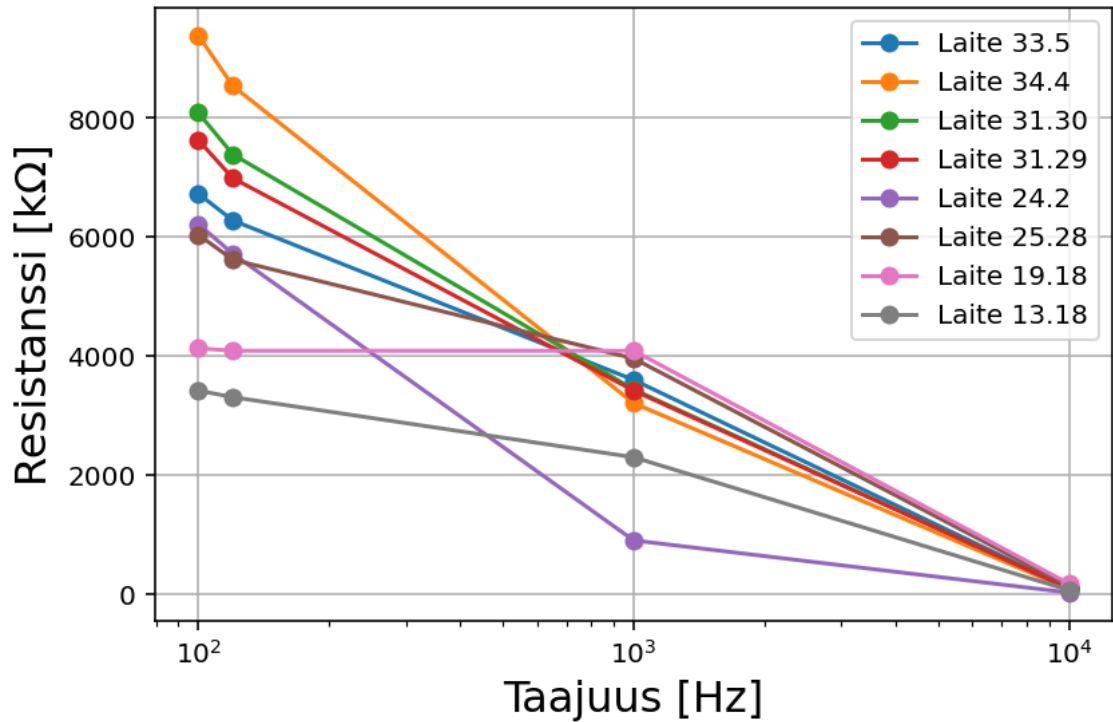
Testaukset suoritettiin koekytkentälevyllä, jossa käytettiin kaistanpäästösuodattimissa olevien vastusten ja kondensaattoreiden arvoja, sekä samoja memristoreita. Käytettyjen vastusten nimellisarvot olivat 10 k Ω , 17 k Ω , 1 M Ω ja 10 M Ω , kondensaattoreiden nimellisarvot olivat 8.2 pF, 100 pF, 820 pF ja 10000 pF. Testit suoritet-

tiin syöttämällä koekytkentälevylle funktiogeneraattorilla taajuuksia ja mittaamalla oskilloskoopilla piiriin sisääntulevaa jännitettä ja kytkennän ulostulevaa signaalia, eli taajuusvastetta. Funktiogeneraattori on elektroninen mittalaite, jolla tuotetaan testausta varten eri sähköisiä aaltomuotoja, kuten sini-, kantti- tai kolmioaaltoja. Sillä voidaan esimerkiksi säätää aaltomuodon amplitudia ja taajuutta.

Funktiogeneraattorilla tehtiin logaritmisia taajuuspyyhkäisyjä äänisignaali-alueella, jolloin saatiin katettua koko päästösuodattimien taajuusalue. Syötetty signaali on sinimuotoista. Vaimeneminen havaittiin oskilloskoopin ruudulta sinimuotoisen aallon amplitudin muutoksena. Ulostulosignaalin amplitudi oli yhtä suuri kuin sisääntulevan signaalin amplitudi, kun suodattimessa ei tapahtunut mitään vaimenusta, tällöin kytkennän vahvistus on myös 0 dB. 0 dB:n vahvistus on passiivisen suodattimen maksimivahvistus.

Testeissä käytettiin erillistä funktiogeneraattoria, eikä tietokoneen kautta tulevaa äänisignaalia, koska tällä tavalla pystyttiin minimoimaan signaalin laadusta johtuvia mahdollisia häiriöitä. Häiriöitä onnistuttiin poistamaan vielä käärimällä koekytkentälevy erillisellä maadoitetulla foliolla. Folio, koekytkentälevy ja funktiogeneraattori oli maadoitettu samaan pisteeseen oskilloskoopin maadoitukseen maasilmukoiden minimoimiseksi. Asettamalla kytkentälevylle komponentteja ali- ja ylipäästösuodattimien mukaisiin kytkentöihin, voitiin mitata taajuusvastetta memristoreilla ja kiinteillä komponenteilla. Testauksella pyrittiin tutkimaan erilaisia komponenttien yhdistelmiä ja niillä saatuja taajuusvasteita.

Memristorien resistanssien arvot mitattiin Keithleyllä ja näitä arvoja käyttäen pystyttiin tunnettujen kiinteiden kondensaattorien arvojen avulla laskemaan teoreettinen taajuusalueen katkaisukohta f_c eri komponenttien yhdistelmille. Vastavasti laskettiin vertailun vuoksi taajuusalueen katkaisukohta f_c kiinteille vastuksille ja kondensaattoreille. Koekytkentälevytesti kiinteillä vastuksilla ja kondensaattoreilla ali- ja ylipäästösuodattimen tapauksessa vastasi hyvin teoreettista taajuusvastet-

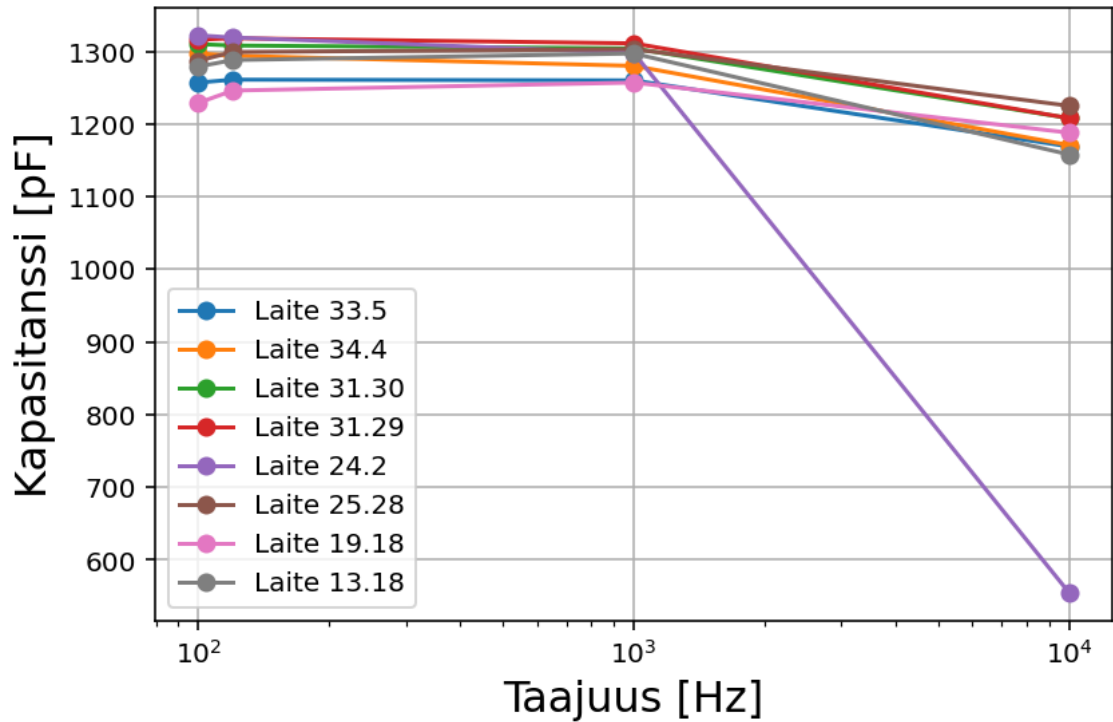


Kuva 19: LCR-mittarilla mitattu memristorien resistanssi taajuuden funktiona.

ta. Testattaessa ali- ja ylipäästösuodattimia memristoreilla, taajuusvasteen vaimenemista ei havaittu oletetusti, kuten kiinteillä vastuksilla. Yksinkertaisimmallakin tapauksella huomattiin eroa vastuksen ja memristorin välillä, kun oletettiin memristorin resistanssin toimivan vastuksena RC-kytkennässä. Tuloksesta oli syytä olettaa, että GCMO-memristorilla on jokin muu sähköinen ominaisuus, joka vaikuttaa sen toimintaan yksinkertaisessa piirissä.

5.2.3 Memristorien taajuusriippuvuus

Hypoteesi oli, että GCMO-memristorien resistanssin rinnalla on myös kapasitanssia, jolloin memristori toimii efektiivisesti kahtena rinnakkaisena komponenttina RC-piirissä. Hypoteesia lähdettiin tutkimaan mittaamalla ensin yksinkertaisella kannettavalla LCR-mittarilla memristorien kapasitanssia ja resistanssia sekä niiden muutosta taajuuden funktiona. LCR-mittari on erikoistyökalu, jolla mitataan sähkökom-



Kuva 20: LCR-mittarilla mitattu memristorien kapasitanssi taajuuden funktiona.

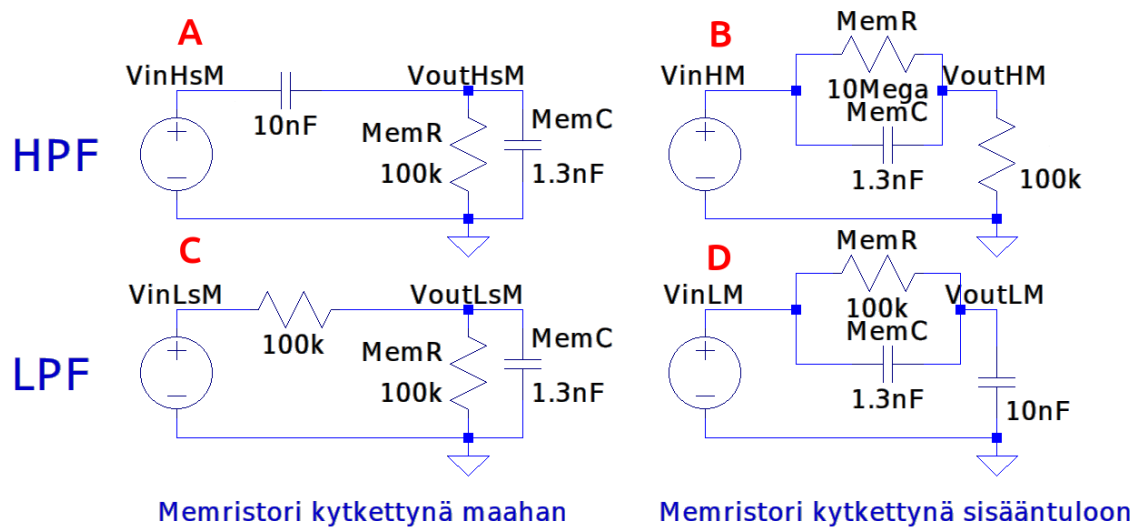
ponenttien kolmea perusominaisuutta. Nämä perusominaisuudet ovat induktanssi L , kapasitanssi C ja resistanssi R .

Mittauksissa havaittiin, että GCMO-memristoreiden resistanssi muuttuu selkeästi taajuuden funktiona. $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ koon memristoreilla havaittiin selkeä kapasitanssi, jolla on myös pieni taajuusriippuvuus käytetyllä taajuusalueella. Mitattu memristorien resistanssi on suurempi mitä pienemmällä taajuudella niitä mitataan. Taajuuden kasvaessa memristorien resistanssi pienenee. Kapasitanssia mitattaessa huomataan sama trendi, mutta heikommalla efektillä. Kapasitanssi pienenee vain noin 10 % mitatulla taajuusalueella. LCR-mittarilla mitattu memristorien resistanssi taajuuden funktiona on esitetty kuvaajassa 19, ja kapasitanssi taajuuden funktiona on esitetty kuvaajassa 20.

5.3 Ali- ja ylipäästösuodattimien karakterisointi memristorilla

LCR-mittarilla tehdyt mittaukset osoittavat, että memristorilla on resistanssin lisäksi myös kapasitanssia, joka on rinnakkain resistanssin kanssa. Memristoreilla saatua taajuusvastetta onnistuttiin toisintamaan vaihtamalla memristorin tilalle kiinteä vastus ja kondensaattori rinnankytkennällä. Näin saatiin simuloitua memristoria kiinteillä komponenteilla. Kiinteän vastuksen ja kondensaattorin arvot olivat suuruusluokaltaan samaa tasoa kuin niiden korvaavalla memristorilla. Kuvassa 21 on esitetty piirikaaviona kiinteillä komponenteilla simuloitu GCMO-memristori ja eri kytkentätavat, joilla ali- ja ylipäästösuodattimet voidaan toteuttaa. Koska memristorilla on resistanssi ja kapasitanssi, se voi toimia ali- ja ylipäästösuodattimen kytkennässä kahdella eri kytkentätavalla, jolloin RC-piirissä memristorista hyödynnetään sen resistanssia tai kapasitanssia signaalin suodattamiseen kytkennässä. Kuvassa 22 on esitetty samanlaisella taajuuspyyhkäisyllä saatu taajuusvaste ylipäästösuodattimella memristorilla ja kiinteillä komponenteilla simuloidulla memristorilla. Kuvasta 22 nähdään, että kiinteillä komponenteilla samalla signaalin taajuuspyyhkäisyllä saatiin hyvin samankaltaiset taajuusvasteet kuin memristorilla.

Oskilloskoopilla mitatut taajuusvasteet näyttivät sekä ali- että ylipäästösuodattimen kytkennällä karakteristiselta ylipäästösuodattimen taajuusvasteelta, kun memristori asetettiin ali- ja ylipäästösuodattimen kytkennässä vastuksen tilalle (kuva 21 A ja D). Mittauksia tehtiin jokaisella käytössä olleella eri suuruisilla kiinteillä kondensaattoreilla. Mitatuista taajuusvasteista huomattiin, että ylipäästösuodattimen kytkennällä (kuva 21 A) taajuusvaste ja signaalin vaimeneminen olivat parempia, kun kiinteän kondensaattorin kapasitanssi oli huomattavasti suurempi kuin memristorin sisäinen kapasitanssi, joka on rinnakkain memristorin resistanssin kanssa. Kun kiinteän kondensaattorin arvo oli huomattavasti pienempi kuin memristorin sisäinen kapasitanssi, ylipäästösuodatinkytkenän taajuusvaste oli hieman alipäästösuodat-

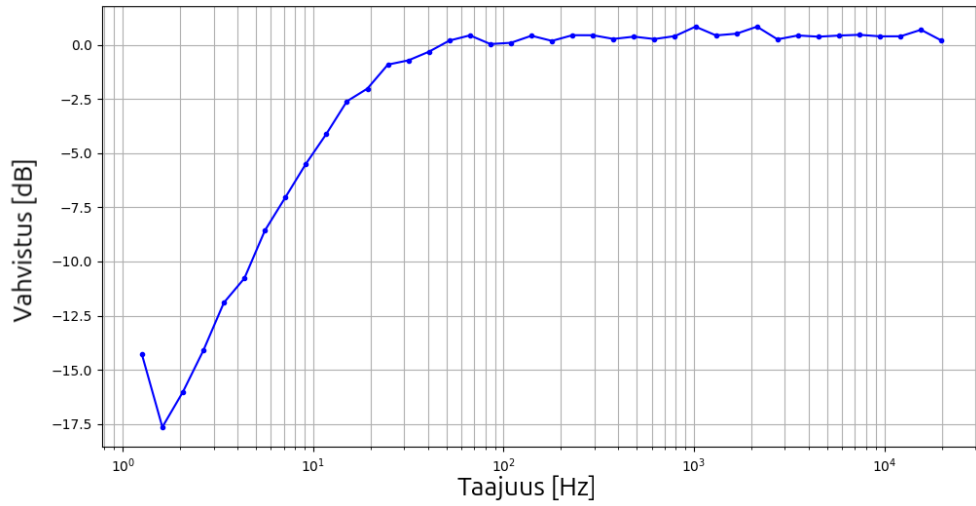


Kuva 21: LTSpice ohjelmalla simuloitu memristori ali- ja ylipäästösuodattimessa kahdella eri konfiguraatiolla.

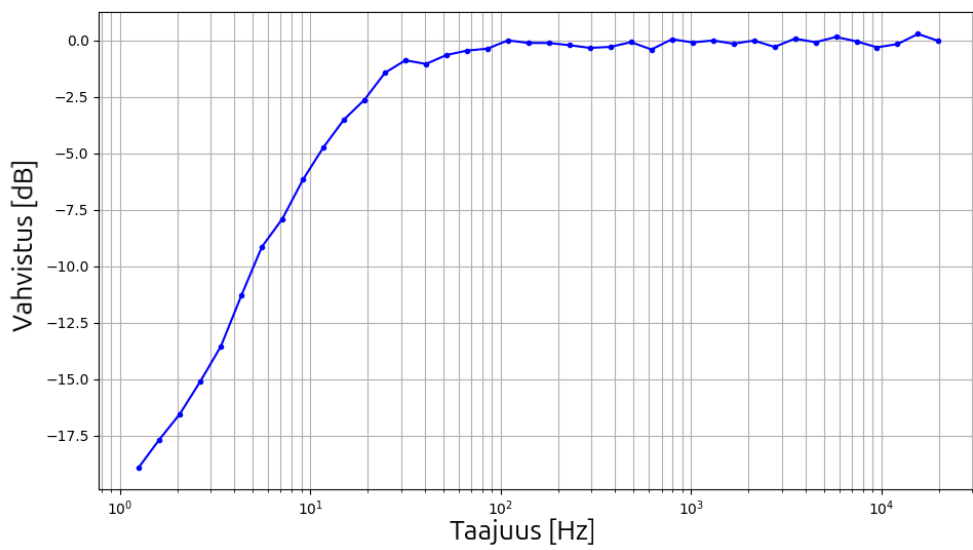
timen kaltainen, joskin hyvin vaimea.

Matalilla taajuuksilla kiinteän kondensaattorin impedanssi on korkea, ja se estää tehokkaasti signaalin kulkua ulostulolle, eli signaali vaimenee. Korkeilla taajuuksilla signaali pääsee ulostulolle kiinteän kondensaattorin impedanssin pienentyessä. Jos memristorin sisäinen kapasitanssi on huomattavasti suurempi kuin sitä edeltävässä kiinteässä kondensaattorissa, muuttuu ylipäästösuodattimen taajuusvaste. Korkeilla taajuuksilla memristorin sisäisen kapasitanssin impedanssi pienenee ja osa signaalista ohjautuu memristorin kautta kytkettyyn maahan eikä ulostulolle.

Tässä opinnäytetyössä on ensimmäistä kertaa havaittu GCMO-memristorien sisäinen kapasitanssi. Memristorien sisäinen kapasitanssi on uusi huomioon otettava ominaisuus piirisuunnittelun optimoinnissa. Sitä ei ole ennen huomioitu, joten nyt on tutkittava, miten memristorien sisäinen kapasitanssi muuttuu ja miten siihen voidaan vaikuttaa. Uusi muuttuja monimutkaistaa aiempaa suunnittelua, mutta sillä voidaan myös saavuttaa parempaa muokattavuutta GCMO-memristoreilla toteutettavissa elektronisissa piireissä.



(a) Taajuusvastekuvaaja memristorilla.



(b) Taajuusvastekuvaaja kiinteillä komponenteilla simuloidulla memristorilla.

Kuva 22: Koekytkenälevyllä toteutettu taajuuspyyhkäisy yksinkertaiselle ylipäästösuodattimelle kiinteällä 10 nF kondensaattorilla (a) memristorilla ja (b) kiinteillä komponenteilla simuloidulla memristorilla.

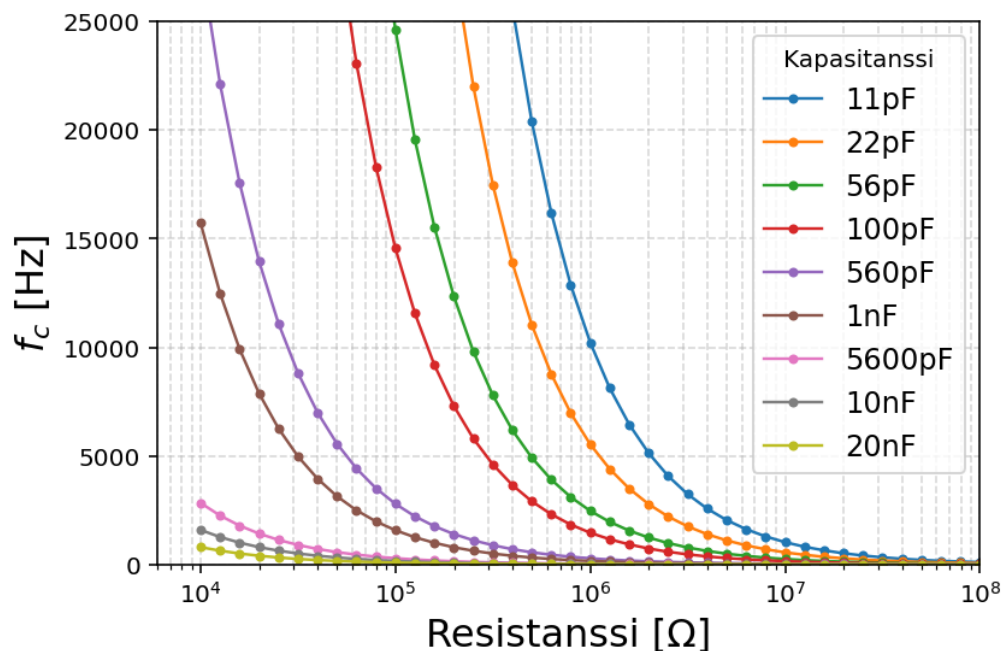
Asettamalla memristori eri tiloihin pulssittamalla sitä erisuuruisilla jännitepulsseilla, saatiin muutettua memristorin resistanssia noin yhden kertaluokan verran. Memristorien kapasitanssin arvo muuttui maksimissaan noin kymmenen prosenttia. Resistanssin ja kapasitanssin arvot mitattiin LCR-mittarilla 120 Hz:n taajuudella, jolloin mitatut resistanssin arvot vastasivat noin Keithleyllä mitattuja resistanssin arvoja.

5.3.1 Alipäästösuodatin

Memristorin kapasitanssia hyödyntämällä sitä voitiin käyttää yhdessä kiinteän vastuksen kanssa muodostamaan kuvan 21 C alipäästösuodatin, jossa memristori korvaa tavallisen alipäästösuodattimen kiinteän kondensaattorin C . Tässä kytkennässä kiinteä vastus on sarjassa sisääntulon kanssa ja memristori on sarjassa vastuksen kanssa ja memristorin toinen pää on kytketty maahan. Ulostulosignaali otetaan komponenttien risteyksestä. Alipäästökytkennässä matalat taajuudet pääsevät kiinteästä vastuksesta läpi, mutta eivät memristorin kapasitanssista. Korkeat taajuudet taas läpäisevät memristorin kapasitanssin ja ohjautuvat siten maahan, jolloin ulostulosignaali vaimenee.

Tässä tutkimuksesta [21] poikkeavasta alipäästökytkennästä memristoria ei käytetä vastuksena vaan kondensaattorina ja tällöin pitää tutkia, voiko taajuusaluetta säätää muuttamalla memristorin tilaa. Koska memristoreilla ei aiemmin oletettu olevan kapasitanssia, täytyi myös tutkia, muuttuuko memristorin kapasitanssi, kun memristoria asetetaan eri tiloihin.

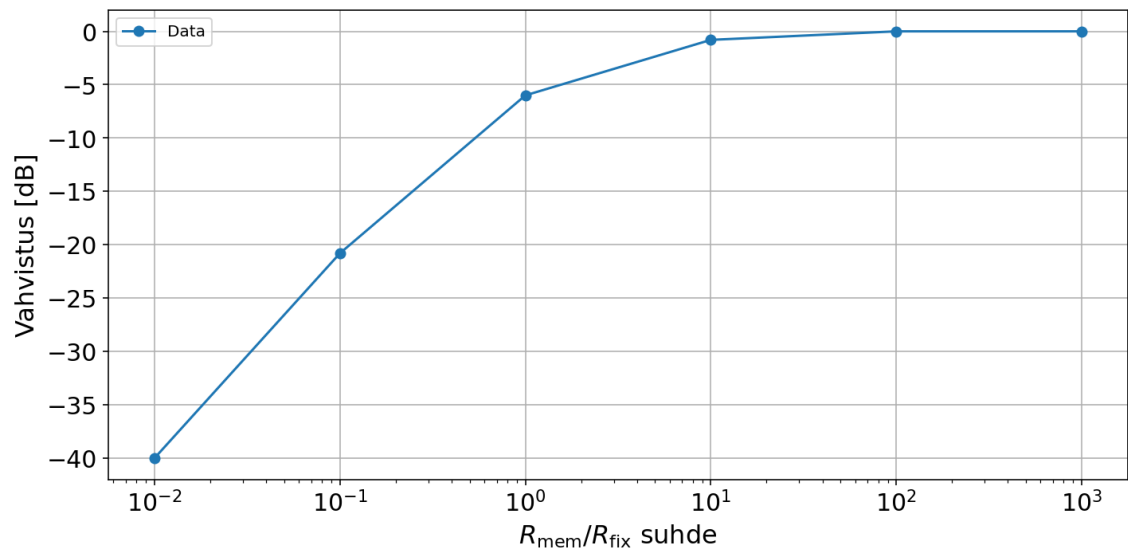
Mitatuista taajuusvastekäyristä nähdään, että memristorin resistanssin muutoksella on hyvin pieni vaikutus alipäästösuodattimen taajuuden katkaisukohtaan. Pie-nemmillä kiinteän vastuksen resistansseilla alipäästösuodattimen päästämät matalat taajuudet olivat signaaliltaan vahvempia kuin korkeammilla kiinteän vastuksen resistansseilla.



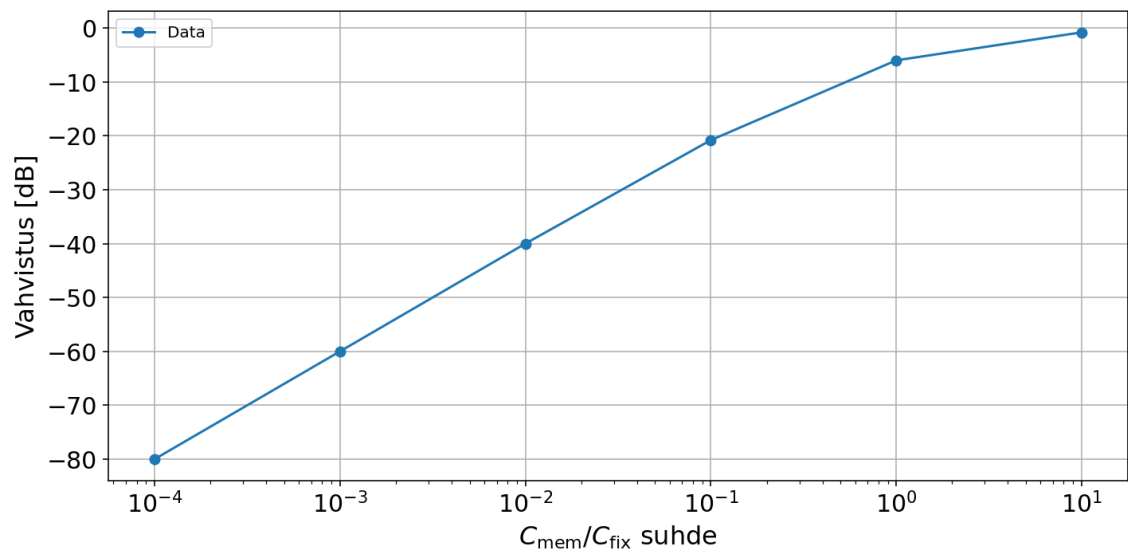
Kuva 23: Simuloidun alipäästösuodattimen (kuva 21 D) taajuusalueen katkaisukohta f_c simuloidun memristorin resistanssin muutoksella eri kiinteillä kondensaattoreilla.

Simulaatioista sen sijaan huomataan, että memristorin kapasitanssia muuttamalla voidaan suodattimen taajuusaluetta säätää. Havaittiin myös, että kun memristorin sisäinen kapasitanssi on pieni ja kiinteän kondensaattorin kapasitanssi on suuri, memristoria voidaan käyttää kytkennässä vastuksen tilalla. Tällöin myös memristorin resistanssin muutoksella on selkeä vaikutus taajuusalueen katkaisukohtaan. Simuloitujen memristorien resistanssin muutoksella saatuja taajuusalueen katkaisukohtia on simuloitu alipäästösuodattimelle kuvassa 23 eri kondensaattoreilla.

Simulaatiossa komponenttien arvoja muutettaessa huomataan, että memristorin resistanssin ja kiinteän vastuksen resistanssin suhteella sekä memristorin kapasitanssin ja kiinteän kondensaattorin kapasitanssin suhteella on merkitys signaalin maksimivaimennukseen ja päästösuodattimen sisääntulevan signaalin vahvistukseen. Sisääntulevan signaalin vahvistusta resistanssien suhteena on esitetty kuvassa 24 ja signaalin maksimivaimennusta kapasitanssien suhteena on esitetty kuvassa 25.



Kuva 24: Alipäästösuodattimen läpipäässeen signaalin voimakkuus memristorin ja kiinteän vastuksen resistanssin suhteen funktiona.



Kuva 25: Alipäästösuodattimen signaalin maksimivaimennus memristorin ja kiinteän kondensaattorin kapasitanssin suhteen funktiona.

5.3.2 Ylipäästösuodatin

Koekytkentälevyllä tehtiin nopeat testit ylipäästösuodattimen kahdelle eri kytkennälle (kuva 21 A ja B). Kytkennällä (kuva 21 B), jossa memristori on sarjassa sisääntulon kanssa ja kiinteä vastus on kytkettynä maahan, näyttää memristorin resistanssin lisäksi myös sen kapasitanssilla olevan vaikutusta taajuusalueen katkaisukohtaan. Tässä kytkennässä kiinteä vastus oli nimellisarvoltaan pieni verrattuna memristorin resistanssiin.

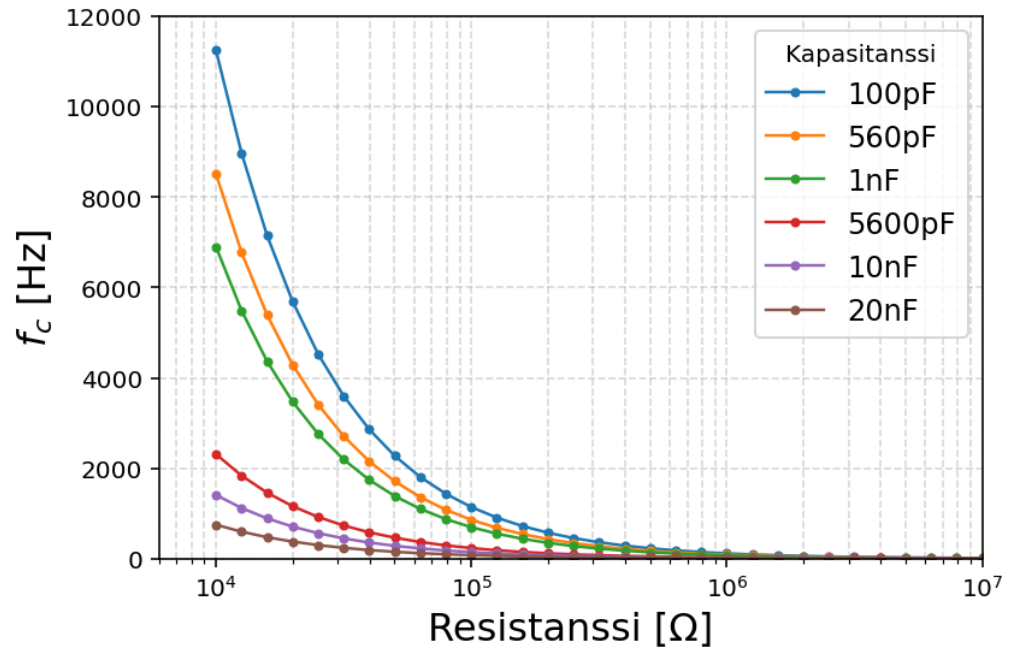
Toisella kytkennällä (kuva 21 A) kiinteä kondensaattori oli sarjassa sisääntulon kanssa ja memristori oli kytketty maahan. Kiinteä kondensaattori oli nimellisarvoltaan korkeampi kuin memristoreiden sisäinen kapasitanssi. Tällä kytkennällä pienemmällä memristorin sisäisellä kapasitanssilla ja resistanssilla näyttää olevan mitätön vaikutus taajuuskaistan katkaisukohtaan.

Simulaatioista samoille kytkennöille saadaan selville, että memristorin resistanssin muutoksella on selkeä vaikutus taajuuskaistan katkaisukohtaan memristorin ollessa kytkennässä kiinteän kondensaattorin jälkeen. Simuloitujen memristorien resistanssin muutoksella saatuja taajuusalueen katkaisukohtia on simuloitu ylipäästösuodattimelle kuvassa 26 eri kondensaattoreilla.

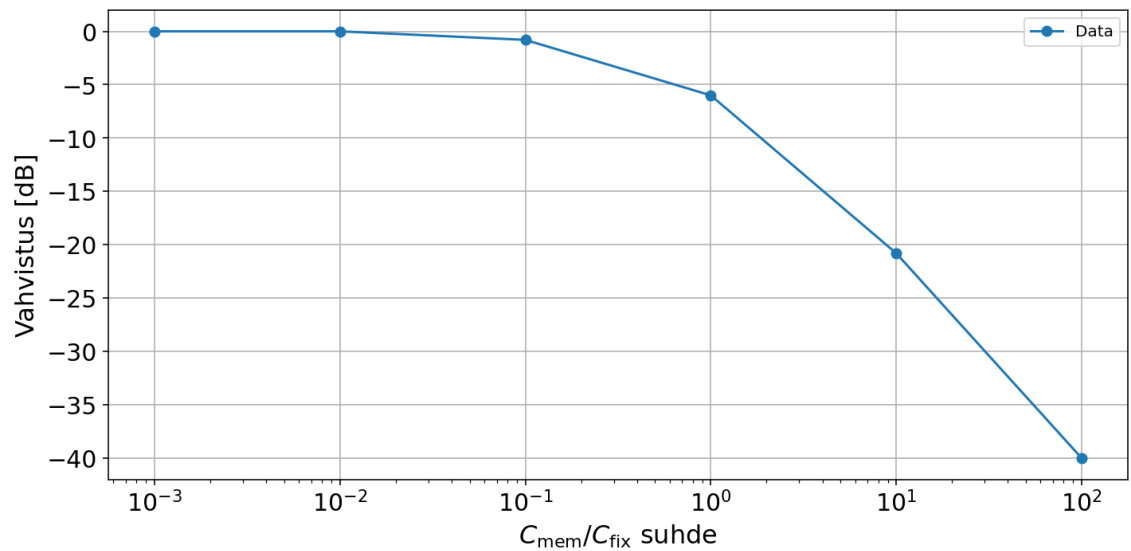
Simulaatiossa komponenttien arvoja muutettaessa huomataan, että memristorin resistanssin ja kiinteän vastuksen resistanssin suhteella sekä memristorin kapasitanssin ja kiinteän kondensaattorin kapasitanssin suhteella on merkitys signaalin maksimivaimennukseen ja päästösuodattimen sisääntulevan signaalin vahvistukseen. Sisääntulevaa vahvistusta kapasitanssien suhteena on esitetty kuvassa 27 ja signaalin maksimivaimennusta resistanssien suhteena on esitetty kuvassa 28.

5.3.3 Memristorien pinta-alan vaikutus

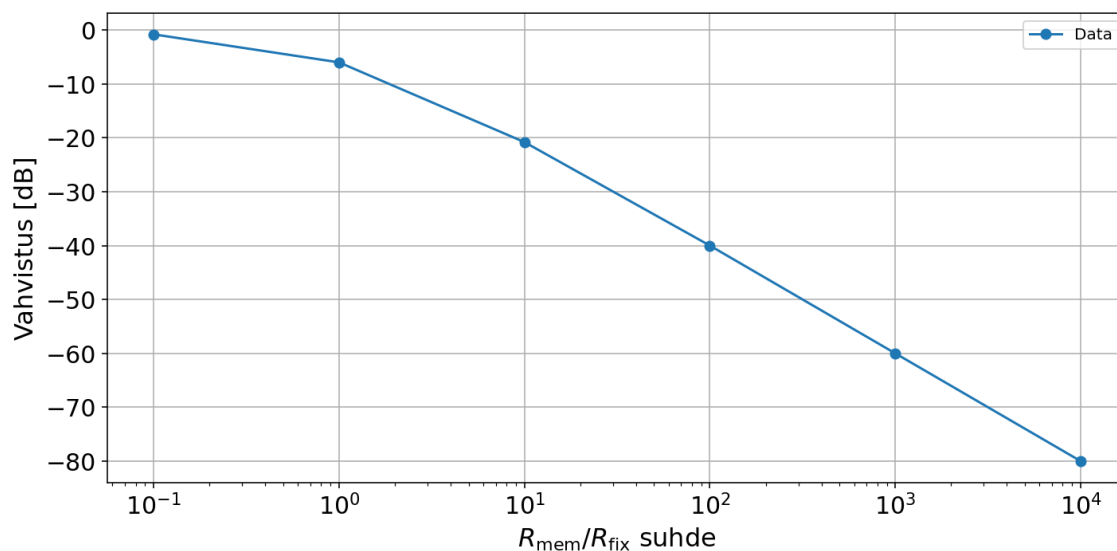
Ali- ja ylipäästösuodattimia optimoitaessa oli hyödyllistä testata useita erilaisia memristoreita. Memristorien resistanssirajoilla oli laitekohtaisia eroja jo samanko-



Kuva 26: Simuloidun ylipäästösuodattimen (kuva 21 A) taajuusalueen katkaisukohta f_c simuloidun memristorin resistanssin muutoksella eri kiinteillä kondensaattoreilla.



Kuva 27: Ylipäästösuodattimen läpipäässeen signaalin voimakkuus memristorin ja kiinteän kondensaattorin kapasitanssin suhteen funktiona.

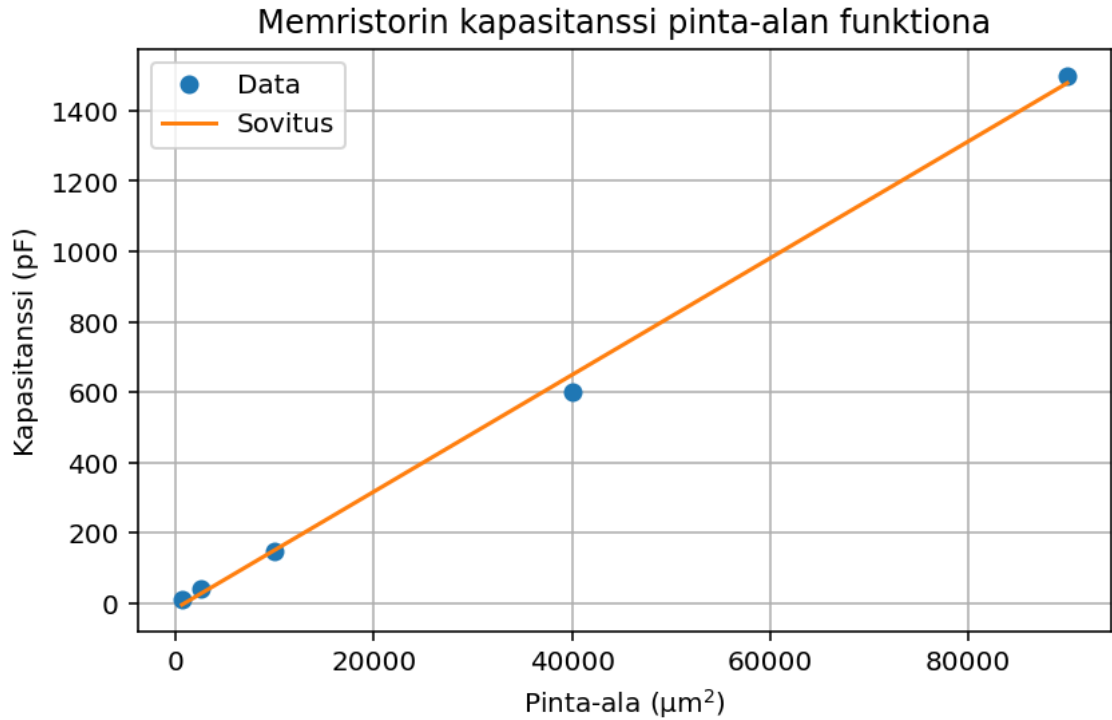


Kuva 28: Ylipäästösuodattimen signaalin maksimivaimennus memristorin ja kiinteän vastuksen resistanssin suhteen funktiona.

koisilla laitteilla, mutta kapasitanssi oli näissä laitteissa hyvin tasainen ja ennustettava. Memristoreista havaitun mitattavan sisäisen kapasitanssin löytymisen myötä oli ilmeistä, että itse memristorin kapasitiivinen rakenne aiheuttaa laitteissa mitattavaa kapasitanssia.

Mitattaessa eri kokoisten memristorien kapasitanssia LCR-mittarilla, havaittiin laitteissa eri kapasitanssien arvoja. Pienellä laitekoolla mitataan pienempi kapasitanssin arvo ja vastaavasti suurella laitekoolla mitataan suurempi kapasitanssin arvo. Kapasitanssi memristorin koon funktiona on esitetty kuvassa 29. Mittaustuloksista havaittiin, että memristoreiden sisäisellä kapasitanssilla on suora riippuvuus laitteen aktiivisen pinta-alan suhteen. Tulos on linjassa levykondensaattorin määritelmän kanssa, jossa kapasitanssilla ja pinta-alalla on lineaarinen yhteys, sillä memristorilaitte koostuu kahdesta johtavasta ohutkalvosta ja niiden välisestä eristävästä kerroksesta. Tällä tuloksella on merkittävä vaikutus GCMO-memristorien valmistukseen niiden sisäisen kapasitanssin kontrolloimiseksi.

LCR-mittarilla havaittiin myös eri kokoisten GCMO-memristorilaitteiden resis-



Kuva 29: Memristorin sisäinen kapasitanssi laitekoon funktiona.

tanssin ja resistanssirajojen muuttuvan, mikä on linjassa aiempien tulosten kanssa [14]. Työssä havaittiin, että memristorin mahdollinen resistanssialue on myös riippuvainen laitekoosta. Pienemmällä laitekoolla on yleisesti suurempi resistanssi kuin suuremmalla laitekoolla.

6 Seuraavan version suunnittelu

Kaistanpäästösuodattimien seuraavassa versiossa pitää ottaa huomioon, minkälaisista kytkentä käytetään ali- ja ylipäästösuodattimissa eri taajuuskaistoissa. Uuden GCMO-memristorien ymmärryksen myötä on myös syytä tarkastella tarvittavien komponenttien määrää seuraavissa kaistanpäästösuodattimissa, sillä vähemmällä komponenteilla saadaan yksinkertaisempi piiri ja voidaan paremmin ennustaa komponenttien toimintaa. Myös kaistanpäästösuodattimien yhdistämistä synapsiverkkoon

on syytä huomioida seuraavissa versioissa, kun itse kaistanpäästösuodattimien toiminta on varmistettu GCMO-memristoreilla. Aiemmassa kaistanpäästösuodattimien versiossa memristoreilla havaitun suuren häiriön arvellaan syntyneen memristorien rinnakkaisesta kapasitanssista ja resistanssista syntyneestä vaihtoehtoisesta reitistä signaalille. Tämä todennäköisesti aiheutti piirissä oskillaatiota, joka vahvistui operaatiovahvistimissa ja synnytti suuren häiriön. Seuraava versio pitää suunnitella tämän havainnon huomioivaksi, joko ylimääräisillä kondensaattoreilla signaalin kirkastamiseksi tai vahvistuksen erottamiseksi kaistanpäästösuodattimista.

6.1 Suunnitteluun vaikuttavat tulokset

Tässä työssä GCMO-memristoreista saatiin selville uusia merkittäviä tuloksia, joita ei ollut aiemmin ajateltu olevan. Tuloksia ovat memristoreista löydetty sisäinen kapasitanssi, memristoreiden taajuusriippuvuus ja aktiivisen pinta-alan vaikutus sisäiseen kapasitanssiin. Tulokset ovat erittäin tärkeitä tässä työssä ja tulevaisuudessa, joissa käsitellään GCMO-memristoreita osana elektronisia piirejä ja taajuuskomponentteja.

GCMO-memristoreista mitatuilla sisäisillä kapasitansseilla on huomattava vaikutus memristorien käyttöön osana elektronisia piirejä. Tämä on tulos, jota ei alkuperäisessä suunnitelmassa otettu huomioon. Sisäinen kapasitanssi monimutkaistaa memristoreita varten tehtäviä muutoksia elektroniikkasuunnittelussa. Kapasitiivista ominaisuutta hyödyntämällä voidaan saavuttaa uusia toiminnallisuksia suunniteltaville piireille. Tässä työssä seuraava versio hyödyntää memristoreiden sisäistä kapasitanssia osana alipäästösuodattimia, korvaten kiinteän kondensaattorin piiristä.

Memristoreita ei oltu aiemmin altistettu taajuuksille, jolloin niiden resistanssin ja kapasitanssin taajuusriippuvuuden löytäminen oli merkittävää varsinkin tämän työn kannalta. Tulevat piirit pitää suunnitella memristorien taajuusriippuvuus huomioon ottaen. Tässä työssä käytettävät taajuudet ovat ihmiskorvan äänialueella,

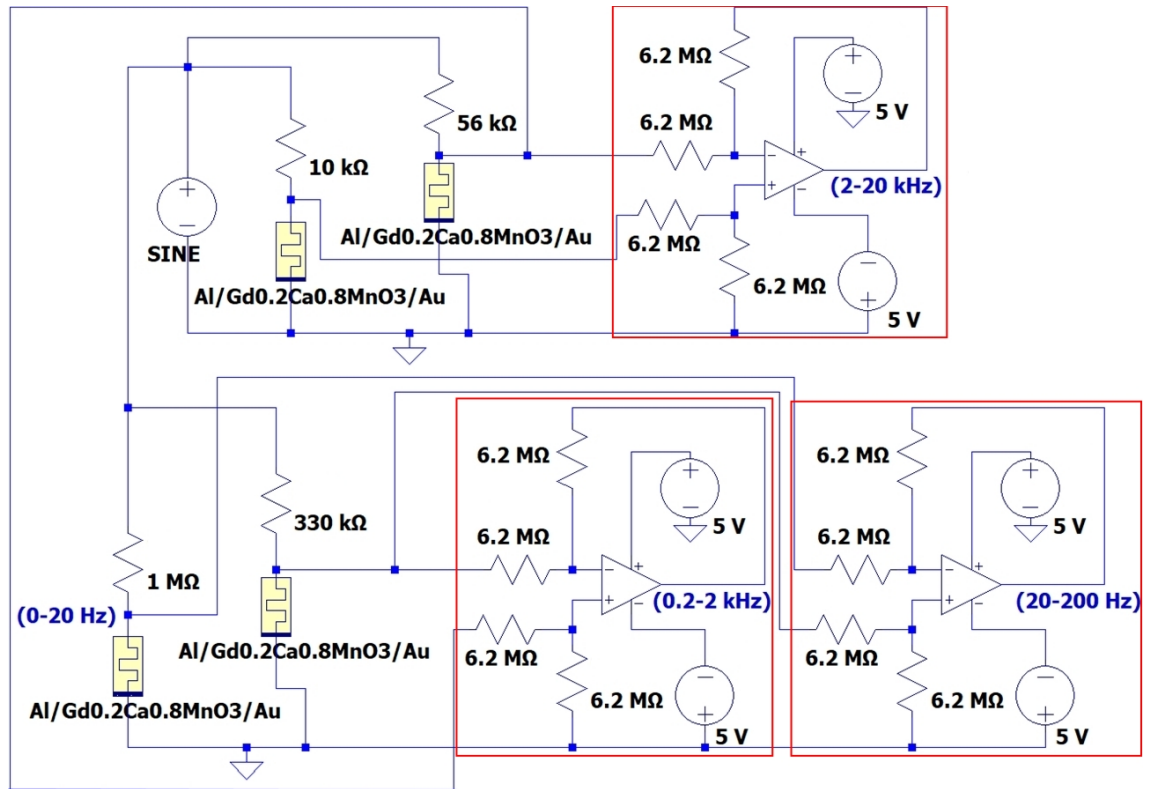
jolloin esimerkiksi GCMO-memristorin sisäinen kapasitanssi on lähes vakio. Tällöin sitä voidaan käyttää luotettavasti kiinteän kondensaattorin tilalla piirissä. Memristorin resistanssi taas muuttuu huomattavasti samalla taajuusalueella, ja siksi tätä ominaisuutta hyödynnetään alipäästösuodattimien taajuusalueen katkaisukohtien määrittämisessä.

Päästösuodattimien optimoinnissa ilmi tulleen kapasitanssin lineaarinen riippuvuus GCMO-memristorin aktiivisen alueen koosta auttaa päästökaistojen suunnittelussa. Tulevissa versioissa voidaan valita halutun kapasitanssin mukaan sopiva memristorilaitteen koko. Memristoreiden valmistusprosessissa voidaan helposti tehdä muutoksia, jotta saadaan erikokoisia laitteita piirisuunnittelua varten. Nämä laitteet voidaan itsenäisesti valita jokaiseen suunniteltuun piiriin yksityiskohtaisesti.

6.2 Kaistanpäästösuodattimien seuraava versio

Kiinteiden komponenttien ja memristorien koon valinnalla on suuri vaikutus suodattimen läpäisseen signaalin vahvuuteen ja suodattuneen signaalin vaimennukseen. Näin voidaan eri kokoisten memristoreiden valinnalla optimoidusti vaikuttaa eri taajuuskaistoihin. Kytkenän valinnassa pitää huomioida memristorin tilaa muuttamalla saavutettava taajuuskaistan katkaisukohdan säätömahdollisuus.

Memristoreille suoritetuista mittauksista eri taajuuksilla huomattiin, että ne ovat hyvin taajuusriippuvaisia jo ihmiskorvan äänialueella. Varsinkin memristorin resistanssi muuttuu herkästi taajuuden vaikutuksesta. Aiemmin jännitteen avulla muutetut tilat ovat olleet pysyviä, jotta niitä voidaan käyttää pysyviä tiloja vaativiin sovelluksiin. Näissä mittauksissa, joissa taajuutta kasvatettiin, havaittiin, että aiemmin vakaat tilat menettivät asteittain tilansa. On siis viitteitä, että jännitteillä asetetut tilat systemaattisesti ajautuivat LRS-tilasta kohti HRS-tilaa taajuuskäsittelyn jälkeen. Tästä tarvitaan vielä mitattua dataa, jotta tilojen käyttäytyminen voidaan dokumentoida.



Kuva 30: Kaistanpäästösuodattimien seuraavan version suunniteltu piirilevyn kyt-
kentäkaavio. Kuvassa on yhteisellä sisääntulolla yhdistetty neljän kiinteällä vastuk-
sella ja memristorilla toteutetun alipäästösuodattimen kytkentä, joista vastuksista
ja vahvistimista koostuvat vähenninpiirit (rajattu punaisella) muodostavat halutut
neljä päästökaistaa. Piirikaavio on tehty LT-Spice-ohjelmalla.

Ehdotuksena jatkossa olisi tutkia kontrolloidusti taajuuden vaikutusta jännitteellä asetettujen tilojen vakauteen. Taajuuden vaikutus pitäisi systemaattisesti tutkia ja selvittää taajuusrajat, joissa GCMO-memristoreiden tilojen pysyvyys muuttuu taajuuskomponentin vaikutuksesta. Näistä tutkimuksista voitaisiin tehdä memristoreille luokittelu taajuusrajoista ja keksiä sovelluksia, joissa voitaisiin hyödyntää näitä vakaita ja taajuudella saavutettavia epävakaita tiloja.

Seuraavassa versiossa kaistanpäästösuodattimet aiotaan toteuttaa yksittäisinä alipäästösuodattimina kiinteän vastuksen ja GCMO-memristorin avulla. Memristorien taajuusriippuvuuden takia korkeamman taajuuden katkaisukohtiin valitaan matalampi kiinteä resistanssi ja vastaavasti matalamman taajuuden katkaisukohtiin valitaan korkeampi kiinteä resistanssi. Taajuuskaistojen katkaisukohtaa voidaan siirtää asettamalla memristori jännitteellä eri tilaan.

Yksittäisistä alipäästösuodattimista saadaan kaistanpäästösuodattimien vaste vähentämällä eri alipäästösuodattimien vasteet toisistaan. Tämä taajuusvasteiden vähentäminen suoritetaan vähenninpiireillä (engl. subtractor circuit). Vähenninpiiri ottaa kahden alipäästösuodattimen signaalin ja vähentää toisen signaalista toisen, jolloin vain näiden erotus jää. Tämä erotus on haluttu taajuuskaista. Esimerkiksi (200 – 2000) Hz:n taajuuskaista voidaan toteuttaa vähentämällä (0 – 2000) Hz:n taajuuskaistan vasteesta (0 – 200) Hz:n vaste, jolloin jäljelle jää (200 – 2000) Hz:n taajuuskaista. Vähenninpiirit toteutetaan vahvistimilla ja vastuksilla. Kuvassa 30 on esitetty piirikaavio seuraavista kaistanpäästösuodattimista.

Piirikaaviossa on neljä memristorilla ja kiinteällä vastuksella toteutettua alipäästösuodatinta sekä kolme vahvistinta ja niiden tarvittavat virtalähteet ja vastukset, jotka muodostavat vähenninpiirit. Matalimmassa (0 – 20) Hz:n taajuuskaistassa vähenninpiiriä ei tarvita, vaan se voidaan toteuttaa yhdellä alipäästösuodattimella. Kaaviossa alipäästösuodattimilla on yhteinen signaalilähde, joka on kuvassa virtalähde, jonka alla lukee SINE.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

GCMO-memristoreista löydetty sisäinen kapasitanssi vaikuttaa niiden käyttöön piirisuunnittelussa. Kapasitanssi on opinnäytetyön sovelluksessa ihmisen kuuloalueella varsin tasainen, jolloin se voidaan kompensoida ja ottaa huomioon. Korkeamman taaajuuden sovelluksissa memristorin sisäinen kapasitanssi pitää ottaa paremmin huomioon suunnitelmissa.

Memristorit voidaan asettaa eri tiloihin, jolloin niiden sähköiset ominaisuudet muuttuvat. Pääasiassa memristorin resistanssi muuttuu ja sitä hyödynnetään taajuuskaistojen muokkaamisessa. Resistanssin muutoksella ja erilaisilla konfiguraatioilla voidaan muuttaa päästökaistan suodattimen alataajuuden ja ylätaajuuden katkaisukohtaa. Näin saavutetaan hyöty taajuuskaistojen muokattavuudessa verrattuna perinteisiin kiinteillä komponenteilla toteutettuihin kaistanpäästösuodattimiin.

Memristorin koolla on vaikutus sen sisäiseen kapasitanssiin ja tällöin myös memristorin mahdolliset resistanssirajat muuttuvat. Valmistamalla eri kokoisia memristoreita saavutetaan piirisuunnittelussa useampia mahdollisuuksia ja vapautetaan tiettyjä rajoitteita, joita aiemmin syntyi esimerkiksi hyvin suurien resistanssien arvojen takia. Eri taajuuskaistat voidaan toteuttaa paremmalla muokattavuudella valitsemalla näihin memristorit kohdennetummin.

Memristorin koon tuomilla eriarvoisilla resistanssirajoilla ja sisäisellä kapasitanssilla on suuri muokattavuus tulevissa memristorisovelluksissa. Sovelluksissa voidaan saavuttaa suurta muokattavuutta käyttämällä eri taajuuksia ja siten muuttaa tai hyödyntää GCMO-memristorien sähköisiä ominaisuuksia.

GCMO-memristoreiden avulla toteutettuja kaistanpäästösuodattimia voidaan hyödyntää äänisignaalien analogisessa suodatuksessa. Memristoreiden resistanssin muutoksella voidaan siirtää kaistanpäästösuodattimien taajuuskaistaa muokkaamalla suodattimen katkaisukohtaa. Tulevaisuudessa kaistanpäästösuodattimet tullaan yhdistämään GCMO-memristoreilla toteutettuun synapsiverkkoon, joka luokittelee suo-

datetut äänisignaalit ja oppii ympäristöstään. Oppivan synapsiverkon avulla voidaan kontrolloida kaistanpäästösuodattimissa olevia memristoreita muuttamaan taajuuskaistojaan tarkemmaksi halutulle taajuusalueelle. Lopullinen taajuusluokittelija voisi siis olla täysin itsenäinen ympäristöön oppiva laite.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tässä opinnäytetyössä on käytetty ChatGPT:n versiota GPT – 5.2 koodin luomiseen työssä esitettyjä kuvaajia varten. Työssä on myös käytetty tekoälypohjaista Keenious-ohjelmaa lähdemateriaalin etsimiseen ja sen läpikäymiseen.

Viitteet

- [1] J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang ja R. Huang, Applied Physics Reviews **7**, 011312 (2020) doi:10.1063/1.5118217.
- [2] H. Zhao, Z. Liu, J. Tang, B. Gao, Y. Zhang, H. Qian ja H. Wu, Tsinghua Science and Technology **27**, 455 (2022) doi:10.26599/tst.2021.9010043.
- [3] S. Choi, J. Yang ja G. Wang, Advanced Materials **32**, 2004659 (2020) doi:10.1002/adma.202004659.
- [4] W. Zhang, B. Gao, J. Tang, P. Yao, S. Yu, M.-F. Chang, H.-J. Yoo, H. Qian ja H. Wu, Nature Electronics **3**, 371 (2020) doi:10.1038/s41928-020-0435-7.
- [5] Y. Yang, C. Bartolozzi, H. H. Zhang ja R. A. Nawrocki, Engineering Applications of Artificial Intelligence **126**, 106838 (2023) doi:10.1016/j.engappai.2023.106838.
- [6] B. Jung, M. Kalcher, M. Marinova, P. Powell ja E. Sakalli, arXiv (2025) doi:10.48550/arXiv.2510.06721.
- [7] Y. Zhang, Z. Wang, J. Zhu, Y. Yang, M. Rao, W. Song, Y. Zhuo, X. Zhang, M. Cui, L. Shen, R. Huang ja J. Joshua Yang, Applied Physics Reviews **7**, 011308 (2020) doi:10.1063/1.5124027.
- [8] M. Hu, H. Li, Y. Chen, Q. Wu, G. S. Rose ja R. W. Linderman, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems **25**, 1864 (2014) doi:10.1109/tnnls.2013.2296777.
- [9] B. Sun, Y. Chen, G. Zhou, Z. Cao, C. Yang, J. Du, X. Chen ja J. Shao, ACS Nano **18**, 14 (2024) doi:10.1021/acsnano.3c07384.
- [10] X. Zhang, Y. Zhuo, Q. Luo, Z. Wu, R. Midya, Z. Wang, W. Song, R. Wang, N. K. Upadhyay, Y. Fang, F. Kiani, M. Rao, Y. Yang, Q. Xia, Q. Liu, M. Liu ja J. J. Yang, Nature Communications **11**, 51 (2020) doi:10.1038/s41467-019-13827-6.
- [11] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart ja R. S. Williams, nature **453**, 80 (2008) doi:10.1038/nature06932.
- [12] S.-O. Park, H. Jeong, J. Park, J. Bae ja S. Choi, Nature Communications **13**, 2888 (2022) doi:10.1038/s41467-022-30539-6.
- [13] A. Beiranvand, *Low bandwidth manganite (Gd, Ca)MnO₃ for future memristor devices* (Turun yliopisto, 2022), available at: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-8865-5>.
- [14] A. Antola, J. Laaksonen, H. Huhtinen, I. Angervo, S. Granroth, A. Schulman, P. Laukkanen ja P. Paturi, ACS Appl. Electron. Mater. **7**, 4242 (2025) doi:10.1021/acsaelm.5c00403.

- [15] V. Lähteenlahti, A. Schulman, A. Beiranvand, H. Huhtinen ja P. Paturi, ACS Applied Materials and Interfaces **13**, 18365 (2021) doi:10.1021/acsami.1c02963.
- [16] A. Antola, I. Angervo, H. Huhtinen, M. Miettinen, A. Schulman ja P. Paturi, Applied Physics Letters **124**, 253502 (2024) doi:10.1063/5.0210544.
- [17] C. D. Mittal, International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology **2**, (2017) doi:10.32628/cseit1722347.
- [18] W. Storr, Band Pass Filter - Passive RC Filter Tutorial, https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_4.html, 2013, online, luettu 1.2.2026.
- [19] W. Storr, Butterworth Filter Design and Low Pass Butterworth Filters, https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_8.html, 2013, online, luettu 1.2.2026.
- [20] W. Storr, Sallen and Key Filter Design for Second Order RC Filters, <https://www.electronics-tutorials.ws/filter/sallen-key-filter.html>, 2021, online, luettu 1.2.2026.
- [21] Y. Li, W. Song, Z. Wang, H. Jiang, P. Yan, P. Lin, C. Li, M. Rao, M. Barnell, Q. Wu, S. Ganguli, A. K. Roy, Q. Xia ja J. J. Yang, Advanced Materials **35**, 2206648 (2023) doi:10.1002/adma.202206648.
- [22] W. Storr, Capacitive Reactance - The Reactance of Capacitors, https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_1.html, 2013, online, luettu 2.2.2026.
- [23] A. B. Williams, *Analog filter and circuit design handbook, McGraw-Hill's AccessEngineering*, first edition. ed. (McGraw-Hill Education, 2014).
- [24] Aspencore, Analogue RC Filters: Low, High, Band Pass, <https://studylib.net/doc/27615528/rc-filters-ebook>, 2023, online, luettu 3.2.2026.
- [25] S. N. Ogugua, O. M. Ntwaeaborwa ja H. C. Swart, Coatings **10**, 1078 (2020) doi:10.3390/coatings10111078.
- [26] N. A. Shepelin, Z. P. Tehrani, N. Ohannessian, C. W. Schneider, D. Pergolesi ja T. Lippert, Chemical Society Reviews **52**, 2294 (2023) doi:10.1039/d2cs00938b.
- [27] J. X. Zhang ja K. Hoshino, kirjassa *Molecular Sensors and Nanodevices (Second Edition)*, *Micro and Nano Technologies*, second edition ed., toimittanut J. X. Zhang ja K. Hoshino (Academic Press, 2019), pp. 43–111 doi:10.1016/b978-0-12-814862-4.00002-8.
- [28] K. L. Berkowski, K. N. Plunkett, Q. Yu ja J. S. Moore, Journal of Chemical Education **82**, 1365 (2005) doi:10.1021/ed082p1365.

- [29] N. Maiti, P. Karmakar, U. D. Barve ja A. V. Bapat, Journal of Physics: Conference Series **114**, 012049 (2008) [doi:10.1088/1742-6596/114/1/012049](https://doi.org/10.1088/1742-6596/114/1/012049).
- [30] A. Antola, *Optimization of Gd(0.2)Ca(0.8)MnO(3)-based capacitive memristors* (Turun yliopisto, 2022), Pro gradu - tutkielma [doi:https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022070551193](https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022070551193).
- [31] H. Y. Hafeez, Z. S. Iro, B. I. Adam ja J. Mohammed, Journal of Physics: Conference Series **1000**, 012124 (2018) [doi:10.1088/1742-6596/1000/1/012124](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1000/1/012124).
- [32] Y.-R. Jeng ja J.-H. Horng, Journal of Tribology **123**, 725 (2000) [doi:10.1115/1.1352744](https://doi.org/10.1115/1.1352744).