

Memristorit

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Fil. yo. Mikko Meriö
Tarkastajat:
Prof. Petriina Paturi
FM Anni Antola

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

MERIÖ, MIKKO Memristorit

LuK-tutkielma, 23 s.

Fysiikka

Helmikuu 2024

Tutkielmassa luodaan yleiskatsaus memristoreihin, eritellään termit ideaalinen ja laajennettu memristori, esitellään resistiivisen kytkennän ilmiö sekä yleisimmät memristorityypit, sekä kaksi memristorien käytännön sovelluskohdetta. Tutustuminen aiheeseen aloitetaan historiallisesta perspektiivistä esittelemällä memristorin alkuperäinen matemaattinen määritelmä vuodelta 1971. Tämän jälkeen käsitettä laajennetaan todellisten memristorilaitteiden mukaan tuomiseksi.

Memristorien toiminta perustuu resistiivisen kytkennän ilmiöön, eli tiettyjen materiaalien kykyyn muuttaa resistiivistä tilaansa irreversiibelisti. Tämä ilmiö voidaan saada aikaiseksi monilla eri menetelmillä, mikä on luonut laajan rintaman erilaisia memristorityyppejä. Yleisimmät tyypit käydään läpi yleisluontoisella tasolla.

Kaksi lupaavaa sovelluskohdetta memristoreille ovat resistiivinen hajasaantimuisti (RRAM) sekä neuroverkot. Memristorien omalaatuiset piirteet saattavat tehdä niistä ylivoimaisia näissä sovelluskohteissa tulevina vuosina. Kehityksessä on tosin myös ongelmia, jotka on ensin ratkottava.

Avainsanat: Memristori, resistiivinen kytkentä, ideaalinen memristori, laajennettu memristori, RRAM

Sisällys

Johdanto	1
1 Memristori	2
1.1 Puuttuva piirikomponentti	2
1.2 Laajennetun memristorin käsite	5
2 Memristorityypit	6
2.1 Johtavat filamentit	7
2.1.1 Sähkökemiallinen metalloituminen	8
2.1.2 Happivakanssien siirtyminen	9
2.2 Rajapintatyyppinen	11
2.3 Faasimuutosmuisti	12
2.4 Muut mekanismit	13
2.5 Luokittelu käyttäytymisen perusteella	15
2.5.1 Unipolaarinen kytkentä	16
2.5.2 Bipolaarinen kytkentä	16
2.5.3 Kynnysarvokytkentä	17
3 Memristorien sovelluksia	17
3.1 Hajasaantimuisti	17
3.2 Neuroverkot	20
4 Yhteenveto	22

Johdanto

Memristori on elektroninen komponentti, jonka resistanssi muuttuu epälineaarisesti siihen kohdistetun jännitteen funktiona¹. Se myös säilyttää resistiivisen tilansa vaikka jännite kytketään pois päältä, joten se soveltuu esim. informaation tallentamiseen [1]. Memristorin teoria esiteltiin vuonna 1971 [2], mutta ensimmäinen toimiva memristori valmistettiin vasta 2008 [3]. Laitteista on viime vuosikymmenen aikana onnistuneesti kehitetty toimivia käytännön sovelluksia mm. memristorein toteutettuja RAM-muisteja, ja synapseja matkivia rakenteita [1, 4, 5]. Memristori on kuitenkin suurelle yleisölle vielä melko tuntematon elektroniikan komponentti. Tämä johtuu ainakin siitä, ettei memristoritekniikka ole vielä levinnyt kuluttajaelektroniikan käyttöön. Memristoreilla ennustetaan kuitenkin olevan tulevaisuudessa merkittävä rooli tietotekniikan komponentteina [5].

Memristorein toteutetuissa komponenteissa on useita etuja verrattuna nykypäivänä yleisesti käytössä olevaan CMOS-teknologiaan (engl. complementary metal-oxide semiconductor). CMOS-teknologia on saavuttamassa ylärajansa laskentatehossa, sillä fysikaaliset rajoitteet alkavat tulemaan vastaan. Laskentatehon lisäys on käytännössä perustunut komponenttien, kuten transistorien, koon pienentämiselle, jotta piirin alalle mahtuu enemmän komponentteja. Piirien koon pienentäminen ei kuitenkaan ole mahdollista loputtomiin, joten vaihtoehtoisia teknologioita tullaan tarvitsemaan. [5]

Memristoreista puhuttaessa tarkoitetaan usein todellisia fysikaalisia laitteita, mutta jos tarkkoja ollaan, ei memristoria termin alkuperäisessä merkityksessä ole fyysisesti edes olemassa [6]. Tämän takia tutkielmassa selitetään aluksi käsitteiden *ideaalinen memristori* ja *laajennettu memristori* ero. Memristorien luokittelun ja resistiivisen kytkennän yhteydessä käsitteiden ja kategorioiden käyttö on hyvin kir-

¹Tätä ei tule pitää memristorin määritelmänä. Kyseessä on eräs mahdollinen tapa luonnehtia (laajennettua) memristoria.

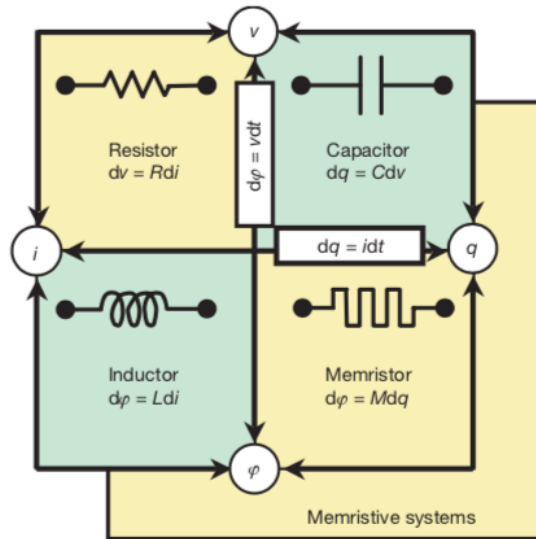
javaa lähteestä riippuen, joten pyrin erottelemaan yleisimmät memristorityypit ja niiden taustalla vaikuttavat mekanismit mahdollisimman selkeästi.

1 Memristori

1.1 Puuttuva piirikomponentti

Nimi *memristori* tulee englannin kielen sanoista *memory resistor* eli vastus, jolla on jonkinlainen "muisti". Memristori esiteltiin ensimmäistä kertaa vuonna 1971 teoreettisena konseptina. Tutkija Leon Chua postuloi tämän neljännen passiivisen piirikomponentin olemassaolon vuoden 1971 artikkelissaan *Memristor - The Missing Circuit Element* [2]. Passiivinen piirikomponentti tarkoittaa virtapiirikomponenttia, joka ei tuo piiriin energiaa, vaan pikemminkin kuluttaa tai varastoi sitä. Kolme muuta fundamentaalista passiivikomponenttia, eli vastus, kondensaattori ja kela, ovat olleet fysikaalisina laitteina olemassa jo vuosisatojen ajan, ja niitä löytyy kaikkialta käyttämästämme elektroniikasta. Niiden toiminnan voi kuvata neljän virtapiirisuureen, I , V , q , ja φ , välisinä relaatioina². I on virta, V jännite, q varaus ja φ magneettivuo (Chua käytti alkuperäisessä artikkelissaan [2] magneettivuon tilalla suuretta käämivuo (engl. flux linkage) eli käämin magneettivuo kerrottuna johdinkierrosten määrällä). Näiden suureiden välillä on yhteensä 6 relaatiota, joista 5 liittyy jo tunnetuihin komponentteihin: vastukseen, kelaan ja kondensaattoriin. Viimeiselle jäljelle jäävälle eli q ja φ väliselle relaatiolle ei kuitenkaan ollut vastaavaa fysikaalista passiivipiirikomponenttia. Chua postuloi memristorin neljänneksi passiivipiirikomponentiksi, joka toteuttaa tämän jäljelle jääneen relaation. Hänen artikkelissaan [2] myös esiteltiin, kuinka tällainen memristori on mahdollista toteuttaa aktiivikomponentin (aktiivikomponentit ovat energiaa piiriin tuovia tai muuten sähkövirran kulkua

²Passiivikomponentit ovat periaatteessa vain Maxwellin yhtälöistä johdettu rajoitettu erikoistapaus, joten ne voidaan matemaattisesti esittää myös kenttäsuureiden \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{D} , \mathbf{B} avulla. [2]



Kuva 1: Neljä fundamentaalia passiivipiirikomponenttia vastus (engl. resistor), ke-la (engl. inductor), kondensaattori (engl. capacitor) ja uusi tulokas eli memristori, sekä niihin liittyvät piirisuureiden relaatiot. Taustalla myös vanha termi *memristiiviset systeemit*³ (engl. memristive systems), joka pitää sisällään tietynlaiset vastukset sekä memristorit. Memristoria kuvaava relaatio $d\varphi = Mdq$ voidaan johtaa myös enemmän Ohmin lakia muistuttavaan muotoon $V = MdI$ ketjusäännön avulla. [3]

ohjaavia komponentteja). Tästä huolimatta memristori liittyy vastuksen, kelan ja kondensaattorin kanssa fundamentaalien passiivipiirikomponenttien joukkoon, sillä sitä ei voida mitenkään toteuttaa pelkästään muiden passiivikomponenttien yhdistelmänä. Kuvassa 1 on esitelty nämä neljä perustavanlaatuisia piirikomponenttia. [2]

Memristorille annetun nimen selittää se, että yksittäisellä ajan hetkellä se toimii periaatteessa kuin vastus, jolla on tietty resistanssi, mutta memristorin kyky vastustaa virran kulkua riippuu siitä, millainen jännite (tai toisaalta sähkövirta) siihen on kohdistettu aikaisemmin. Tämän takia memristorin virtaa vastustavalle ominaisuudelle on annettu nimi memristanssi ja vastaavasti aineelle ominainen memristiivisyys (konduktanssia vastaava suure olisi memduktanssi). Toinen memristoria leimaava ominaisuus on epälineaarinen luonne verrattuna esim. tavalliseen vastukseen,

joka Ohmin lain mukaisesti vastustaa sähkövirtaa lineaarisesti sitä enemmän, mitä suurempi jännite on. Toisin sanoen jännitehäviö riippuu lineaarisesti sähkövirran suuruudesta. Memristanssi on siis varauksen q epälineaarinen funktio $M(q)$. Mikäli M sattuisi olemaan vakio, saadaan tuttu resistanssi eli R . Kuten myöhemmin tullaan huomaamaan, memristorissa ensinnäkin jännitteen polariteetti vaikuttaa virran itseisarvon suuruuteen (tosin tämä ei ole ideaalisen memristorin ominaisuus), ja virta-jännite-käyrät ovat hyvin epälineaarisia. [2, 3]

Chuan määritelmästä seuraa kuusi ominaisuutta, jotka memristorin tulee toteuttaa [7]:

1. Laite on kaksinapainen.
2. Laite on yhden tilanmuuttujan funktio.
3. Toteuttaa yhtälön $d\varphi = Mdq$, jossa M on aiemmin mainittu memristanssi.
4. $I(V)$ -käyrä on kiertosymmetrinen ja muistuttaa 45° kulmassa olevaa ∞ -symbolia (eli siinä esiintyy hystereesiä).
5. Laite on passiivinen.
6. $I(V)$ -käyrä leikkaa itsensä origossa.

Chuan artikkelissa [2] ei oteta kantaa postuloidun memristorin fysikaaliseen rakenteeseen eikä toimintamekanismiin, vaan ainoastaan ehdotetaan sellaisen mahdollisen löytyminen. Seuraavassa luvussa nähdään, että alkuperäinen suureita q ja φ yhdistävä määritelmä, joka tuossa artikkelissa [2] annettiin, muuttui myöhemmin *ideaalisen memristorin* määritelmäksi. Itse asiassa tässä luvussa termi *memristori* on aina viitannut ideaaliseen memristoriin, koska emme ole käsitelleet vielä muita tapauksia. Kuitenkin yleisnimitystä memristori käytetään nykyisin kirjallisuudessa, kun tarkoitetaan laajennettua memristoria³ [7–9], johon perehdytään seuraavassa luvussa.

1.2 Laajennetun memristorin käsite

Edeltävässä kappaleessa kuvailtua ideaalista memristoria ei ole vielä tähän päivään mennessä onnistuttu valmistamaan fyysisenä laitteena [6, 7], ja on epäilty, että sellaisen valmistaminen on todennäköisesti jopa mahdotonta [6]. Käsite *laajennettu memristori* (alunperin memristiivinen systeemi³) luotiin kattamaan sellaiset laitteet, jotka toiminnaltaan muistuttavat ideaalista memristoria, mutta eivät toteuta kaikkia kuutta ideaalisen memristorin ominaisuutta. Vuonna 2008 esiteltiin ensimmäinen toimiva laajennettu memristori [3]. Oikeastaan laajennetun memristorin käsitteen alle sopivia laitteita (ohutkalvolaitteita, joilla on esiintynyt huomattavaa $I(V)$ -hystereesiä) on valmistettu jo aikaisemmin, mutta niitä ei ole tunnistettu memristoreiksi käsitteen ollessa vielä melko tuntematon [6].

Yleisesti laajennettu memristori ei toteuta yhtälöä $d\varphi = Mdq$, sillä magneettivuota ja varausta on vaikea liittää toisiinsa. Ilman tätä relaatiota on kuitenkin mahdollista saavuttaa $I(V)$ -hystereesiä. $I(V)$ -hystereesikäyrän voisi sanoa olevan tärkein laajennettuja memristoreja määrittelevä piirre, sillä ilman tätä ominaisuutta laite muistuttaa enemmän tavallista vastusta kuin memristoria. Oikeastaan kaikista muista kuudesta listatusta ominaisuudesta joudutaan joustamaan todellisten fyysisten memristorien kanssa [7]. Tästä eteenpäin käytämmekin termiä memristori tarkoittamaan laajennettuja memristoreja, sillä jäljemmissä luvuissa käsitellään todellisia memristoreja, jolloin ideaalinen memristori on epäoleellinen käsite. Termiä *memristiivisyys*, voidaan käyttää kuvaamaan memristorille ominaista käyttäytymistä ja se tarkoittaa tiivistetysti, että $I(V)$ -käyrät ovat epälineaarisia suljettuja hystereesikäyriä ja laite säilyttää resistiivisen tilansa ulkoisen jännitteen poistuessakin.

³Joskus käytetään myös nimitystä *memristiivinen systeemi* (engl. memristive system), jonka Chua esitteli vuonna 1976 [8], mutta tämä nimitys on myöhemmin korjattu *laajennetuksi memristoriksi* Chuan kirjassa vuonna 2019 [9]. Eri nimityksiä on kuitenkin yhä käytössä, mikä voi aiheuttaa sekaannuksia.

2 Memristorityypit

Memristorien toiminta perustuu laitteen puolijohde-/eristemateriaalin resistiivisyyden muutokseen ulkoisen jännitteen (virran) avulla reversiibelisti [10–12]. Memristoreissa ilmenevälle resistiivisyyden muutokselle käytetään yleisesti englanninkielistä termiä *resistive switching* (lyh. RS, suom. *resistiivinen kytkentä*). Puolijohteen tai eristeen resistiivisyyden muutos irreversiibelisti voisi tarkoittaa yksinkertaisesti sähköistä läpilyöntiä, jossa materiaalin kiderakenne muuttuu paremmin sähköä johtavaksi siihen kohdistetun liian suuren jännitteen (virran) takia. Tällainen muutos on pysyvä, eikä tällöin ole kyse RS-ilmioistä. Memristoreissa materiaalin resistiivisyyttä pystytään muuttamaan reversiibelisti eli kiderakennetta pystytään muovaamaan edestakaisin matalan johtavuuden ja korkean johtavuuden tilojen välillä [11]. Laitteen resistanssia voidaan siis kontrolloidusti vaihdella korkean ja matalan resistanssin tilojen välillä. Usein memristoreilla onkin juuri kaksi stabiilia resistiivisyyden tilaa, jotka ovat selvästi erotettavissa, ja siten niitä voidaan käyttää esim. bittien koodaamiseen (1 vastaa matalaa ja 0 korkeaa resistanssia [13]). Laitteen resistanssin muuttamisen lisäksi sopivasti valitulla ulkoisella jännitteellä voidaan lukea laitteen resistiivinen tila muuttamatta sitä [10]. Tällä tavoin RS-materiaaleja voidaan käyttää tiedon tallentamiseen. Käytän tässä tutkielmassa korkean ja matalan resistiivisyyden tiloille lyhenteitä HRS-tila ja LRS-tila (engl. HRS=high resistivity state, LRS=low resistivity state).

Memristoreissa käytettyjen materiaalien resistiivinen tila (useimmiten) säilyy, kun ulkoinen jännite poistetaan, ja siksi puhutaan, että laitteella on muisti [11]. Em. ominaisuus tarkoittaa, että memristori on tietotekniikan termein ns. haihtumaton muisti (engl. non-volatile memory). Nykyisin yleisessä käytössä olevat RAM-muistien tekniikat ovat kaikki haihtuvia muisteja (engl. volatile memory) eli muisti tyhjenee ylläpitojännitteen poistuessa. Memristorien muistin haihtumattomasta luonteesta olisi siis etuja nykyisiin RAM-tekniikoihin verrattuna. Todellisuudessa

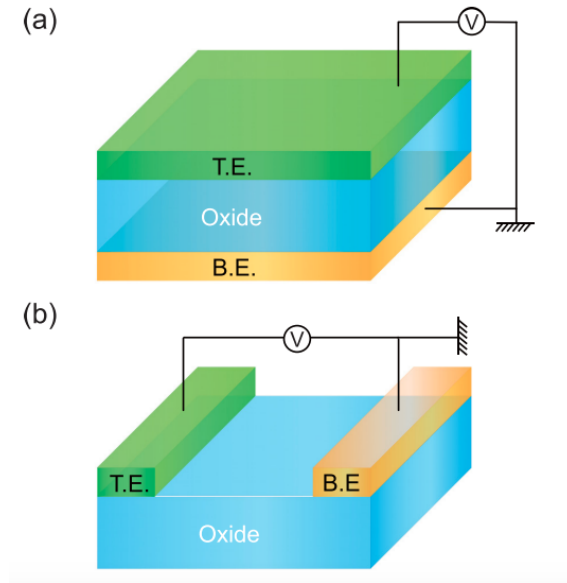
resistiivisen tilan säilymisaika vaihtelee memristorityypistä riippuen. Ainakin filamenttityyppisillä memristoreilla tilan pysyvyys (engl. retention) on pitkäkestoista (> 1000 vuotta [1]), mutta joillain ei-filamenttityyppisillä memristoreilla voidaan havaita LRS-tilan purkautumista kohti HRS-tilaa ajan myötä, eli puhutaan lyhyen ajan muistista (engl. short-term memory) [7].

Resistiivisen kytkennän ilmiö pystytään saavuttamaan useilla erilaisilla materiaaleilla, kuten oksideilla, nitrideillä, tyypillisillä puolijohdemateriaaleilla ja jopa orgaanisilla materiaaleilla. Memristorien kannalta kiinnostavin ja eniten tutkittu ryhmä ovat erilaiset oksidit [11].

Täysin yhtenäistä memristorityyppien ja RS-mekanismien luokittelua ei ole olemassa, ja käytetyt nimitykset sekä luokittelut vaihtelevat jonkin verran lähteestä riippuen. Fysikaalisten mekanismien lisäksi RS-ilmiö voidaan luokitella $I(V)$ -käyttäytymisen perusteella kolmeen kategoriaan: unipolaarinen, bipolaarinen, sekä kynnyksarvokytkentä (engl. unipolar, bipolar, threshold) [10–12]. Vielä ennen eri mekanismeihin perehtymistä on syytä esitellä kaksi vaihtoehtoista rakennetta memristorille: planaarinen, jossa elektrodit ovat oksidikerroksen päällä, sekä kapasitiivinen rakenne, jossa oksidikerros on elektrodien välissä [11]. Nämä on esitelty kuvassa 2.

2.1 Johtavat filamentit

Johtavien filamenttien (engl. conductive filaments, lyh. CFs) perusidea on se, että elektrodien välissä on eristävää materiaalia, johon muodostuu sähkökentän vaikutuksesta pitkittäisiä filamentteja elektrodilta toiselle. Näiden filamenttien johtavuus on eristettä suurempi, jolloin resistanssi elektrodien välillä laskee. Filamenttien muodostuminen voidaan itseasiassa jakaa kahteen eri mekanismiin: *sähkökemialliseen metalloitumiseen* ja *happivakanssien siirtymiseen*. Kummankin mekanismin toiminta on pystytty mikroskopiolla havaitsemaan [11].



Kuva 2: a) Kapasitiivinen memristorirakenne, jossa oksidimateriaali on sijoitettu elektrodien (napojen) väliin. Tämä on yleisin käytetty geometria. b) Planaarinen memristorirakenne, jossa elektrodit on asetettu oksidikerroksen päälle. [11]

2.1.1 Sähkökemiallinen metalloituminen

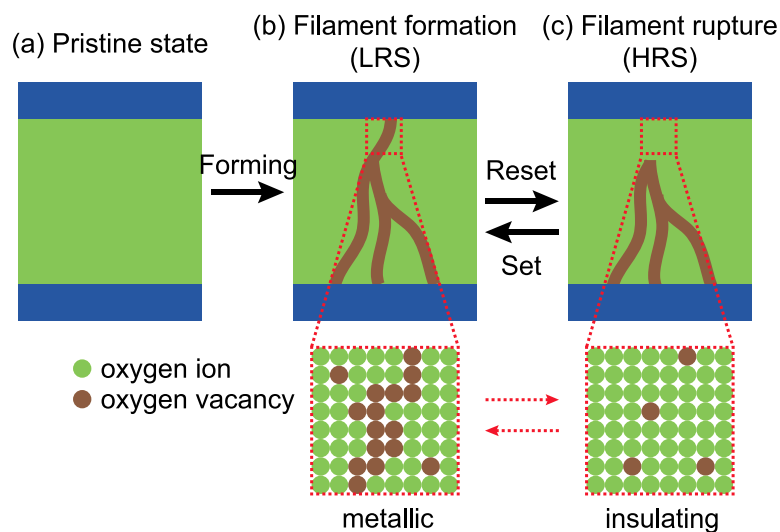
Sähkökemiallisessa metalloitumisessa (engl. electrochemical metallization, lyh. ECM) eristemateriaali on kiinteää elektrolyyttiä (ei siis välttämättä oksidi), toinen elektrodi inerttiä metallia ja toinen sähkökemiallisesti aktiivista [1, 11]. Inerttinä elektrodina käytetään mm. platinaa tai iridiumia, ja aktiivisena hopeaa tai kuparia [1]. Ulkoinen oikean polariteetin sähkökenttä saa aktiivisen elektrodin metalliatomeja ionisoitumaan positiivisiksi metalli-ioneiksi, jotka kulkeutuvat sähkökentässä elektrolyytin läpi kohti inerttiä elektrodia [1, 11]. Ioneista muodostuu elektrodien välille metallisia johtavia filamentteja. Tämä aikaansaa memristorin siirtymisen HRS-tilasta LRS-tilaan. Vastakkaisen polariteetin sähkökenttä polttaa filamentin poikki (vrt. sulake), jolloin memristori palaa HRS-tilaan [1]. Hopeafilamenttien muodostuminen ja hajoaminen ja näistä johtuva laitteen resistiivisyyden muuttuminen havaittiin ensimmäisen kerran jo vuonna 1976, joten ECM on yksi ensimmäisiä mekanismeja, joilla RS-ilmiö on alunperin havaittu [1].

2.1.2 Happivakanssien siirtyminen

Tässä mekanismissa on myös tarkoitus luoda johtavia filamentteja elektrodien välille, mutta ECM:stä poiketen filamentit eivät ole metallisia, vaan happivakanssien muodostamia. Vakanssi tarkoittaa kiteessä olevaa hilapistettä, josta puuttuu atomi. Happivakanssit ovat siis puuttuvia happiatomeja eli positiivisesti varattuja aukkoja kiteessä [11]. Happivakanssien siirtyminen (engl. oxygen vacancy migration) on fysikaalisesti monimutkaisempi prosessi selittää kuin ECM. Elektrodimateriaaleiksi valitaan metalleja, jotka eivät osallistu filamenttien muodostumiseen, jolloin ilmiö perustuu vain happivakanssien liikkeeseen [1]. Kytettäessä sähkökenttä positiivisesti varautuneet happivakanssit käyttäytyvät positiivisten ionien lailla ja muodostavat pitkittäisiä filamentteja elektrodien välille [1]. Filamentit eivät ole metallisia, mutta niiden johtavuus on muuta kidettä suurempi, joten laite siirtyy LRS-tilaan. Filamentteja voi ajatella ikään kuin heikkoina sähköisinä läpilyönteinä (engl. soft dielectric breakdown), mikä tarkoittaa, että kiderakenteeseen ei ole syntynyt irreversiibeliä muutosta [12]. Polariteetiltaan toisen suuntainen sähkökenttä saa filamentin hajoamaan tai repeämään osittain, kuten kuvasta 3 nähdään.

Elektrodien välisenä materiaalina käytetään yleisimmin erilaisia oksideja, etenkin siirtymämetallioksideja [1]. Käytetyt siirtymämetallioksidit ovat puolijohteita ja sisältävät runsaasti happivakansseja, joita mekanismin toimiminen vaatii [1]. Koskemattomassa (engl. pristine) kiteessä happivakansseja on homogeenisesti ympäri kidettä ja resistiivisyys on maksimissaan. RS-ilmiön esille saaminen vaatii niin kutsutun *muodostumisvaiheen* (engl. forming), jossa filamentti muodostuu ensimmäisen kerran (ks. kuva 3). Tämän vaiheen jälkeen resistiivisyys on koskematon tilaa alhaisempi, ja materiaali on nyt LRS-tilassa. HRS-tilaan palatessa filamentti menee siis katki hajoamatta kuitenkaan täysin eikä yhdistä enää elektrodeja.

Tämä mekanismi luokitellaan monessa lähteessä termin *valenssimuutosmekanismi* (engl. valence change mechanism, lyh. VCM) alle [1, 11]. Valenssimuutosmekani-



Kuva 3: a) Materiaali (vihreä alue) on koskemattomassa tilassa (engl. pristine state). Resistiivisyys elektrodien (sinisten palkkien) välillä on suuri. b) LRS-tila. Elektrodeja yhdistää happivakanssien muodostama ketju, jonka johtavuus on muuta kidettä suurempi. c) HRS-tila. Happivakanssien ketju on osittain katki, mutta ei täysin hajonnut. Johtavuus on siten suurempi kuin a-kuvassa. Kuvien a ja b välinen nuoli kuvaa johtavan filamentin muodostumista (engl. forming) elektrodien välille. Kuvan b LRS-tilasta päästään kuvan c HRS-tilaan nollausprosessissa (engl. reset) ja toiseen suuntaan asetusprosessilla (engl. set). [11]

nismi sisältää myös seuraavassa luvussa käsiteltävän rajapintatyyppisen mekanismin [1]. Molemmat perustuvat happivakanssien liikkeeseen, mutta toisessa muodostuu koko oksidin ylittäviä filamentteja, kun taas toisessa mekanismissa resistiivisyyden muutos tapahtuu oksidin ja elektrodimetallin rajapinnassa.

2.2 Rajapintatyyppinen

Kuten edeltävä happivakanssiin perustuva filamenttimekanismi, myös *rajapintatyyppinen* (engl. interface-type) mekanismi luokitellaan valenssimuutosmekanismin alle [1]. Tämä mekanismi nimensä mukaisesti perustuu happivakanssien liikkeeseen oksidin ja elektrodin rajapinnassa [12], toisin kuin koko oksidin läpi rakentuva filamentti. Kuten edellä, myös tässä mekanismissa hyödynnetään puolijohtavia siirtymämetallioksiedeja, joissa on runsaasti happivakansseja [12]. VCM-mekanismi voidaan tunnistaa joko rajapinnassa tapahtuvaksi tai filamenttityyppiseksi, kun tarkastellaan, miten laitteen koko — erityisesti oksidi-elektrodi-rajapinnan pinta-ala — vaikuttaa resistiivisyyteen. Mikäli rajapinnan laajentaminen laskee resistiivisyyttä, voidaan tulkita mekanismi rajapintatyyppiseksi [12]. Toisaalta jos rajapinnan alalla ei ole suurta vaikutusta resistiivisyyteen, on melko selvää, että mekanismi on filamenttityyppinen [12]. Rajapintatyyppinen mekanismi on filamenttityyppiä hankalampi havainnoida mikroskopialla.

Rajapintatyyppinen mekanismi perustuu oksidikerroksen ja aktiivisen elektrodimetallin välisen rajapinnan kontaktiresistanssin muutoksiin ulkoisen sähkökentän myötä [12]. Kontaktiresistanssi voidaan ymmärtää metalli-puolijohdeliitoksen Schottky-johtavuusmallilla [10, 12]. Liitos ei siis ole tavallinen ohminen liitos, jonka resistanssi olisi vakio [10, 12]. Kontaktiresistanssin suuruuteen vaikuttaa ns. Schottky-potentiaalivalli (engl. Schottky barrier) liitoskohdassa [10]. Kun tämä potentiaalivalli on kapea, ollaan LRS-tilassa, sillä elektroneilla on suurin todennäköisyys tunnelloitua sen läpi. Vastaavasti potentiaalivallin ollessa leveä, memristori on

HRS-tilassa, koska elektronien tunnelloituminen on epätodennäköistä ja siten resistiivisyys suuri [12]. Potentiaalivallin leveyttä säätelee liitoksen tyhjennysalueen leveys [12]. Tyhjennysalueen leveyteen vaikuttaa happivakanssien paikat liitoksen läheisyydessä [12]. Ulkoisella jännitteellä voidaan liikuttaa happivakansseja aivan kuten filamenttityyppisessä mekanismissakin, säätäen siten tyhjennysalueen leveyttä ja lopulta Schottky-vallin leveyttä [12]. Tämä poikkeaa *tavallisesta* Schottky-johtavuudesta metalli-puolijohdeliitoksessa. Tavallisesti hilan donori- ja akseptori-ionit eivät pääse liikkumaan, vaan tyhjennysalueen luo pelkkä elektronien rekombinoituminen aukkojen kanssa. Schottky-johtavuus on siis tasasuuntaavaa, eli virta kulkee helpommin päästösuuntaan eikä juurikaan estosuuntaan. Tämä selittää, miksi rajapintatyyppinen memristori on käytännössä aina bipolaarinen [12].

2.3 Faasimuutosmuisti

Faasimuutosmuistissa (engl. phase change memory, lyh. PCM) elektrodien välisen aineen eri faasit vastaavat muistin eri tiloja (esim. bittejä 1 ja 0) ja muistin toiminta perustuu nimensä mukaisesti tämän aineen faasimuutoksiin. Materiaalin faasia voidaan muuttaa kiteisestä amorfiseksi ja toisinpäin sähkövirran avulla. Useimilla aineilla kiteinen faasi on sähkönjohde ja amorfinen faasi hyvä eriste, joten laite voidaan saattaa HRS- ja LRS-tiloihin. Faasimuutokset perustuvat lämpötilan muutoksiin. Amorfinen faasi muuttuu kiteiseksi, kun sitä lämmittää tarpeeksi (noin 500–600 K [13]), mutta ei kuitenkaan sulamispisteeseen asti (sulamispisteet yleensä ≈ 1000 K [13]). Kiteisestä amorfiseen faasiin päästään lämmittämällä materiaali yli sulamispisteen, jolloin kiderakenne katoaa, ja sen jälkeen antamalla sen jäähtyä nopeasti, niin ettei kiderakenne ehdi muodostua, vaikka olomuoto muuttuu kiinteäksi. Memristorikäytössä⁴ lämmittävä efekti luodaan laitteen läpi kulkevan virtapulssein

⁴Faasimuutosmateriaaleja käytetään memristorien lisäksi laajasti myös muussa elektroniikassa. Esimerkiksi CD, DVD ja Blu-Ray teknologiat perustuvat faasien erilaisiin optisiin ominaisuuksiin. Näissä teknologioissa faasimuutokseen vaadittu lämpötila tuotetaan laserpulsseilla. [13]

avulla. [1, 13]

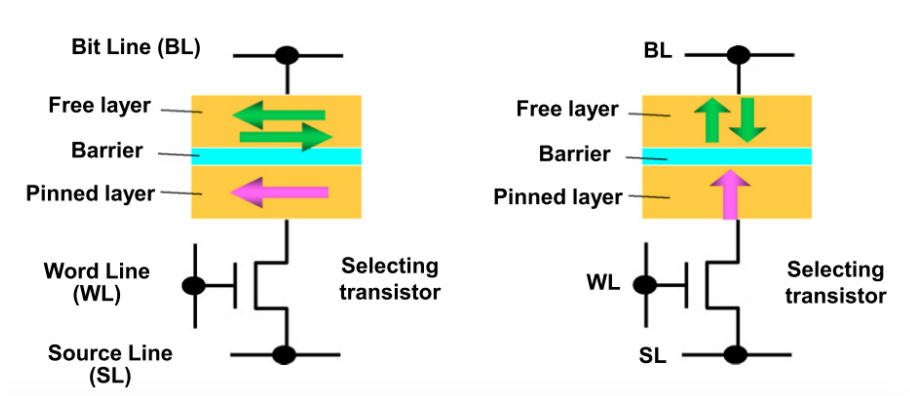
2.4 Muut mekanismit

Magneettisessa tunnelointikytkennässä (engl. magnetic tunnel junction, lyh. MTJ) resistiivisyyden muutos saadaan aikaan metallisten elektrodien erilaisilla magneettisilla orientoitumisilla. Laitteen rakenne vaikuttaa samanlaiselta kuin edellä esitellyissä memristorityypeissä, eli laitteessa on kaksi elektrodia ja niiden välissä eristävä materiaalia. Nyt kuitenkin elektrodit ovat ikään kuin laitteen aktiiviset osat, ja niiden välistä materiaalia kutsutaan tunnelointiesteeksi (engl. tunnel barrier) [14].

Elektrodikalvojen magneettikentät voivat olla suuntautuneet kalvon suuntaisesti tai kohtisuoraan sitä vastaan, kuten kuvasta 4 nähdään. Tyypillisesti toisen ns. kiinnitetyn elektrodin magneettikenttä (eli materiaalin magnetisaatio) on lukittu vakioksi, ja toisen vapaan elektrodin magnetisaatiota voidaan muuttaa sähkövirran avulla. Elektroneilla on tietty todennäköisyys tunneloitua tunneloitumisesteen läpi elektrodilta toiselle. Elektronin spinin tulee säilyä tunneloitumisessa, joten elektrodien magneettikenttien suunnat vaikuttavat siihen todennäköisyyteen, jolla elektroneja voi tunneloitua. Kun elektrodien kentät ovat samansuuntaiset, on suurin osa elektronien spineistäkin samansuuntaisia ja tunneloitumistodennäköisyys on suurimmillaan, mikä johtaa suurimpaan virtaan. Tällöin resistanssi on pienimmillään eli ollaan LRS-tilassa. Magneettikenttien ollessa vastakkaissuuntaiset, ovat elektronit pääosin spiniltään erisuuntaisia eri elektrodeilla. Tällöin virta on pienimmillään eli resistanssi suuri, ja laite on HRS-tilassa. [1, 14]

Resistiivistä tilaa vaihdetaan siten, että sähkövirta indusoi magneettikentän, joka kääntää vapaan elektrodin magneettista orientaatiota. Resisttiivisyyden muutosta kuvataan tunnelointi magneto-resistanssisuhteella (engl. tunnel magneto-resistance, lyh. TMR). [1, 14]

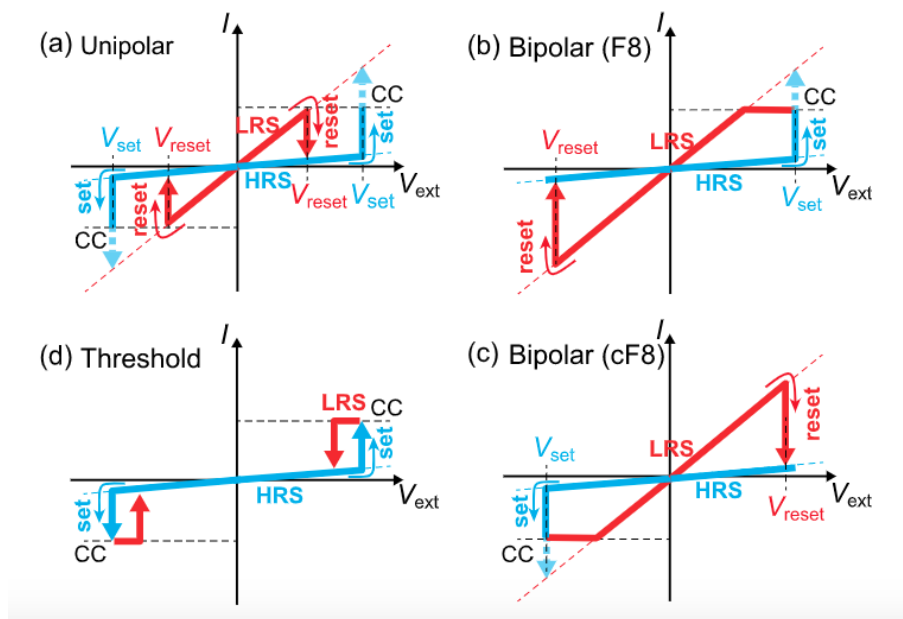
Ferrosähköinen tunnelointikytkentä (engl. ferroelectric tunnel junction, lyh. FTJ)



Kuva 4: Magneettinen tunnelointikytkentä kahdella eri tavalla toteutettuna. Magneettikenttien suunnat voivat olla joko kalvon suuntaiset tai kohtisuorasti kalvoa vastaan. Vapaa elektrodi = free layer, kiinnitetty elektrodi = pinned layer, eristävä kerros = barrier. [14]

on MTJ:n kehittyneempi versio, jossa tunnelointiesteenä on ohut ferrosähköinen, eli pysyvästi polarisoitu, kalvo. Elektronien tunneloitumistodennäköisyyttä kuvaa nyt TMR:n sijaan tunnelointi elektro-resistanssisuhde (engl. tunneling electroresistance, lyh. TER), joka riippuu ferrosähköisen kalvon polarisoituman suunnasta. [1]

Spinin siirtomomentti (engl. spin-transfer torque, lyh. STT) on edelleen pidemmälle kehitetty versio MTJ:stä. Siinä on kuvan 4 kaltainen rakenne, mutta kirjoitusväylä (word line) puuttuu. STT perustuu spin-polarisoiuihin elektroneihin, jotka kääntävät vapaan kalvon magneettikentän polarisaatiota. Se on tavallaan MTJ:tä yksinkertaisempi toteuttaa, koska kirjoittamiseen käytetty virta kulkee laitteen läpi, toisin kuin MTJ:ssä, jossa täytyy olla erillinen väylä magneettikentän indusoidulle virralle. Sähkövirta spin-polarisoituu kulkiessaan kiinnitetyn kalvon läpi. Kun spin-polarisoitu virta on tarpeeksi suuri, saa se käännettyä vapaan kalvon polarisaation (spinien luoma magneettikenttä vuorovaikuttaa vapaan kalvon magnetisaation kanssa). Toisen suuntaisessa virrassa elektronit kulkevat ensin vapaan kalvon läpi. Vastakkaispolarisoidut elektronit kimpoavat kiinnitetyn kalvon ja este kerroksen rajapinnasta takaisin kohti vapaata kalvoa. Kun takaisin kääntyvien elektronien määrä



Kuva 5: HRS- ja LRS-tilojen $I(V)$ -käyrät esiteltynä: a) unipolaarisella, b) ja c) bipolaarisella, sekä d) kynnyksarvokytkennällä. I on virta, V_{ext} on ulkoinen jännite, V_{reset} on nollausjännite ja V_{set} on asetusjännite. CC:llä merkitty vaakasuuntainen katkoviiva tarkoittaa virralle asetettua maksimiarvoa, jonka tarkoitus on estää laitteen läpi kulkevan virran kasvaminen liian suureksi kun siirrytään LRS-tilaan. [11]

on tarpeeksi suuri, vapaan kalvon polarisaatio kääntyy. Kun kalvojen magneettiset polarisaatiot ovat samansuuntaiset, on laite matalan resistanssin tilassa, sillä elektronit kulkevat helpoiten laitteen läpi. Erisuuntaisilla polarisaatioilla saavutetaan korkean resistanssin tila. [14]

2.5 Luokittelu käyttäytymisen perusteella

Resistiivinen kytkentä ilmentää kolmea erilaista $I(V)$ -käyttäytymistä. Näitä vastaavat $I(V)$ -käyrät on esitetty kuvassa 5.

2.5.1 Unipolaarinen kytkentä

Unipolaarisessa tapauksessa materiaalin resistiivisyys riippuu vain ulkoisen jännitteen amplitudista. Materiaali vaihtaa HRS-tilasta LRS-tilaan, kun tietty nollausjännite (V_{reset}) saavutetaan. Resistiiivisyys alkaa kasvaa hyvin voimakkaasti, ja virran arvot päätyvät HRS-käyrälle, kuten kuvassa 5a. Siirtyminen HRS-tilasta LRS-tilaan tapahtuu, kun saavutetaan asetusjännite (V_{set}), jolloin HRS-tilasta huolimatta virta alkaa kasvaa hyvin voimakkaasti eli resistiivisyys pienenee. Virralle asetetaan usein maksimiarvo estämään sen nousemista liian suureksi, joka voisi aiheuttaa materiaaliin epätoivottuja irreversiibeileitä muutoksia, johtuen materiaalin rikkoutumiseen. Koska jännitteen polariteetilla ei ollut merkitystä, niin HRS- ja LRS-käyrät V, I -koordinaatistossa ovat origon suhteen pistesymmetrisiä. Kuvassa 5a V_{set} on itseisarvoltaan suurempi kuin V_{reset} . Näin on myös useimmissa materiaaleissa. [10, 11]

2.5.2 Bipolaarinen kytkentä

Toisin kuin unipolaarisessa tapauksessa, bipolaarisessa tapauksessa jännitteen polariteetilla on väliä, kuten nimestäkin voidaan päätellä. Nytkin muutos HRS \rightarrow LRS tapahtuu V_{reset} jänniteellä, ja muutos toiseen suuntaan V_{set} jännitteellä, mutta nyt jännitteiden polariteetit ovat keskenään erimerkkiset. Esimerkiksi kuvan 5b tapauksessa $V_{\text{set}} > 0$ ja $V_{\text{reset}} < 0$. Kuvassa 5c jännitteiden polariteetit ovat vastakkaiset. Nähdään myös, että virran rajoitus tarvitsee asettaa vain siihen polariteettiin, jossa HRS \rightarrow LRS tapahtuu, koska vain siinä muutoksessa virta voi kasvaa arvaamattoman suureksi; LRS-käyrällä tiedetään resistiivisyyden alkavan kasvaa ja rajoittavan virtaa, kun virran itseisarvo kasvaa tarpeeksi suureksi. Huomataan myös, että nyt käyrien ei tarvitse olla symmetriset origon suhteen. [10, 11]

2.5.3 Kynnysarvokytkentä

Kuvassa 5d esitellään myös kolmas harvinaisempi käyttäytyminen, joka muistuttaa unipolaarista kytkentää. Kynnysarvokytkennässä LRS on stabiili vain hyvin pienellä jännitealueella, joten se ei sovellu haihtumattomaksi muistiksi. Sitä voitaisiin kuitenkin käyttää esim. kytkimenä. [11]

3 Memristorien sovelluksia

Tähän asti on keskitytty siihen, millaisilla eri mekanismeilla memristorit vaihtavat HRS- ja LRS-tilojen välillä eli laitteen kirjoittamiseen. Kirjoittaminen tapahtuu yleensä paljon suuremmalla jännitteellä kuin laitteen niin kutsuttu lukeminen. Käytännön sovellusten kannalta (1/0-kytkintä lukuunottamatta) memristorin tila pitää pystyä myös lukemaan eli mittaamaan sen resistanssi muuttamatta tilaa. [4]

Käytännön sovellusten kannalta on oleellista, että HRS- ja LRS-resistanssit ovat selvästi erotettavissa toisistaan ja tilojen säilyvyys on halutulla tasolla [1]. Laitteen kestävyys (engl. endurance) mittaa sitä, kuinka hyvin laite kestää jatkuvaa rasitusta eli peräkkäisiä vaihteluja HRS- ja LRS-tilojen välillä.

3.1 Hajasaantimuisti

Eräs memristorien käytännön sovellus on hajasaantimuisti (engl. random access memory, lyh. RAM), eli käytännössä tietokoneiden käyttömuistin toteuttaminen memristorein. Tyypillinen memristoripohjaisen RAM-muistin rakenne on kuvan 6 kaltainen poikkipuoristikko [10]. Rakenteessa rivit ovat bittilinjoja (engl. bit line) ja sarakkeet sanalinjoja (engl. word line) [11]. Memristorilaitteet asetellaan linjojen risteyskohtiin. Rakenne voidaan ajatella taulukkona tai matriisina, jossa jokaisella memristorilla on oma kaksinumeroinen indeksinsä [5]. Yksinkertaistetusti muistin lukeminen toimii niin, että käyttäen sopivaa jännitettä syötetään tarpeeksi pieni

virta bittilinjoille, josta se kulkee memristorien läpi sanalinjoille muuttamatta memristorien resistiivistä tilaa [10]. Käytetyn jännitteen suuruus suhteessa laitteen läpi kulkeneen virran suuruuteen kertoo kunkin memristorin resistanssin. Kirjoittaminen eli resistiivisen tilan muuttaminen tapahtuu asetus- tai nollausjännitteellä.

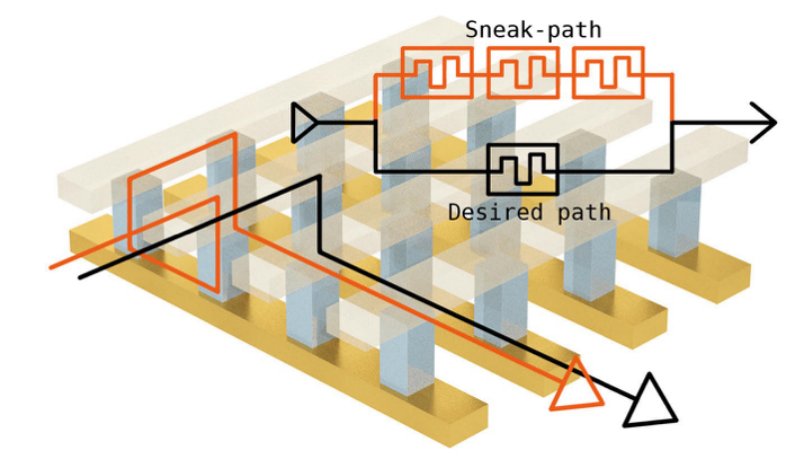
RAM-muistin memristorit voivat olla toteutettu millä tahansa aikaisemmin esitellyistä mekanismeista. Eniten potentiaalia on herättänyt VCM ja CF-mekanismi mm. siksi, että ne ovat parhaiten yhteensopivia nykyisen CMOS-teknologian (engl. complementary metal-oxide semiconductor) kanssa [4, 15]. Näillä mekanismeilla toteutettuja RAM-muisteja nimitetään RRAM tai ReRAM (engl. resistive random access memory)⁵.

RRAM:in etuna on muistin haihtumattomuus ja hajasaantimuistin nopeus samassa laitteessa. Nykyiset CMOS-pohjaiset DRAM-muistit (engl. dynamic random access memory) ovat nopeita lukea ja kirjoittaa, mutta niiden muisti tyhjenee laitteen sammussa. Tai jos muisti halutaan säilyttää, tarvitsee ylläpitojännitettä käyttää, mikä lisää virrankulutusta. Lisäksi RRAM:n virrankulutus ja hukkalämmön tuotto ovat pienempiä kuin DRAM:ssa. Yleisessä käytössä olevat haihtumattomat muistit kuten kovalevyt (HDD) ja flash-pohjaiset muistit esim. SSD:t, SD-kortit ja USB-muistitikut säilyttävät informaatiota pitkään, mutta ovat auttamattoman hitaita tietokoneiden käyttömuisteiksi. [5]

Jo edellä mainittujen etujen lisäksi RRAM mahdollistaa von Neumannin pullonkaulan ohittamisen. Von Neumannin pullonkaula tarkoittaa tietokoneen laskentayksikön ja muistiyksikön välisen tiedonsiirron aiheuttamaa viivettä ja ylimääräistä energiankulutusta, jotka seuraavat siitä, että nämä yksiköt sijaitsevat fyysisesti erillään. Pullonkaula vältetään yhdistämällä muisti- ja laskentatoiminnot samalle laitteelle, minkä RRAM mahdollistaa. [5]

Ajatellaan poikkipuuristikkon bittilinjan pituudeksi N kappaletta johdinrivejä

⁵Faasimuutosmuistilla toteutettu versio on PCRAM (engl. phase change RAM) ja magneettinen versio on MRAM (engl. magnetic RAM).



Kuva 6: Memristorein toteutetun RAM-muistin poikkipuurakenne ja virran mahdollisia kulkureittejä. Musta nuoli kuvaa haluttua reittiä ja oranssi nuoli vuotovirran reittiä. [10]

ja sanalinjan pituudeksi M kappaletta johdinsarakkeita. Riveille syötetyt virrat voidaan ajatella muodostavan pystyvektorin \mathbf{N} ja sarakkeita pitkin poistuvat virrat vaakavektorin \mathbf{M} . Tällöin poikkipuuristikon kaikkien memristorien tilan lukeminen tuottaa matriisikertolaskun $\mathbf{N}(\mathbf{NM})$. RRAM:illa voidaan siis suorittaa laskutoimituksia suoraan muistin sisällä, ilman tarvetta siirtää muistissa olevaa informaatiota laskentayksikölle ja laskutoimituksen jälkeen takaisin muistiin. [4, 5, 15]

RRAM-muisteissa on vielä ratkaisemattomia ongelmia, jotka on saatava kuntoon ennen kuin laitteita voidaan ottaa laajamittaiseen käyttöön. Eräs tällainen on kuvassa 6 esitetty vuotovirta (engl. sneak current). Riville syötetty virta ei välttämättä kuljekaakaan halutun memristorin läpi, mikäli vieressä olevien memristorien kautta löytyy matalamman resistanssin reitti eli ns. vuotovirtareitti (engl. sneak-path). Tästä seuraa muistia lukiessa lukuvirhe ja kirjoittaessa se lisää energiankulutusta. Toinen merkittävä ongelma on rivien ja sarakkeiden johdinten resistanssi (engl. wire resistance), joka pudottaa potentiaalia matalammaksi sitä mukaa mitä pidemmälle johdinta kuljetaan. Keskellä poikkipuurakennetta olevien memristorien napojen välille tulee siten pienempi jännite kuin tavoiteltua. [5, 10, 15]

3.2 Neuroverkot

Toinen mielenkiintoinen sovelluskohde memristoreille on neuroverkot. Neuroverkot ovat biologisia hermosolujen muodostamia verkostoja, kuten aivoja, matkivia rakenteita. Aivojen hermoverkosto koostuu suuresta määrästä toisiinsa liittyneitä hermosoluja eli neuroneita. Yksinkertaistetusti verkoston toiminta on seuraavanlainen: Yhdessä neuronissa on useita tuojahaarakkeita (denriitti) ja yksi viejähaarakke (aksoni). Denriiteissä on synapseja eli neuronien välisiä liitoksia toisten hermosolujen aksoneihin. Neuroneissa (eli käytännössä denriiteissä ja aksoneissa) informaatio kulkee solukalvossa etenevinä sähköisinä pulsseina, kun taas synapsiliitoksissa kemialliset välittäjäaineet kuljettavat tiedon saapuvasta signaalista ja sen suuruudesta seuraavalle neuronille. Neuronin soomassa (eli neuronin omien denriittien ja aksonin välisessä alueessa) denriittejä pitkin saapuvat jännitesignaalit summautuvat. Mikäli tietty raja-arvo ylitetään, neuroni lähettää sille ominaisen suuruisen jännitesignaalin aksonia pitkin kohti aksoniin liittyneitä synapseja. Signaalien täytyy saapua soomaan tarpeeksi lyhyen ajan sisällä, jotta ne summautuvat. Raja-arvo voi toki ylittyä pelkästään yhdenkin denriitin signaalista, mikäli se on tarpeeksi voimakas. [1, 5, 16]

Plastisiteetti tarkoittaa hermoverkoston kykyä muovautua esim. neuronien muodostaessa uusia synapsiliitoksia ja hävittäessä vanhoja sen mukaan, mitkä väylät ovat suuremmalla käytöllä kuin toiset. *Synaptinen plastisiteetti* (engl. synaptic plasticity) tarkoittaa synapsiyhteyden vahvistumista tai heikentymistä aktiivisuuden perusteella. Yhteyden voimistuminen tai heikentyminen perustuu välittäjäaineiden toimintaan. [1, 5, 16]

Neuroverkoilla pyritään matkimaan näitä yllä esiteltyjä ominaisuuksia. CMOS-pohjaisia neuroverkoja on tehty lähinnä ohjelmallisesti, kun taas memristorein toteutus voi muistuttaa hermoverkostoa jo ihan fyysiseltä rakenteeltaan [10]. Tämä on mahdollista, sillä memristorien käyttäytyminen ja ominaisuudet muistuttavat neu-

ronien toimintaa [1]. CMOS-laitteet eivät sen sijaan lainkaan muistuta neuroneita ominaisuuksiltaan, joten neuroverkko on toteutettava ohjelmistopuolella monimutkaisin algoritmein, mikä ei laskentatehon kannalta ole optimaalinen ratkaisu [1].

Itseasiassa edeltävässä luvussa esitelty RRAM-poikkipuurakenne toimii myös neuroverkkojen rakentamisessa [4]. Synaptista plastisiteettia matkitaan liittämällä kuhunkin memristoriin painokerroin (engl. synaptic weight), joka imitoi välittäjäaineiden aiheuttamaa synaptisen yhteyden vahvistumista/heikentymistä [4]. Painokerroin muuttuu sen mukaan saako memristori polariteetiltaan positiivisia vai negatiivisia signaaleja.

Neuroverkkojen yhteydessä pyritään memristorien mahdollisimman suureen lineaarisuuteen, jolloin neuronin matkivan memristorin käytös on parhaiten ennustettavissa [4], sekä unipolaarisuuteen. Tällöin painokertoimen käyttö on suoraviivaisempaa [1], sillä vain signaalipulssin etumerkkiä muuttamalla voidaan kasvattaa tai pienentää painokerrointa [4]. Epälineaarisuus ja voimakas bipolaarisuus lisää painokertoimen päivitysalgoritmille asetettuja vaatimuksia [1, 4]. Vaikka yleisesti lineaarisuus ja ennustettavuus ovat hyviä piirteitä neuroverkon memristoreille, voi maltillisesta satunnaisuudesta olla joskus myös hyötyä [1].

Edeltävässä luvussa esitellystä matriisikertolaskusta on hyötyä neuroverkkojen toteutuksessa, sillä synaptiset painokertoimet voidaan ajatella tässä kertolaskussa esiintyvän matriisin alkioina [1, 5]. Memristoritoteutus laskee painokertoimien uudet arvot eli matriisikertolaskun ihan luonnostaan, kuten edeltävässä luvussa esiteltiin, ja samalla kertoimien päivitetty arvot tallentuvat memristoreihin niiden resistiivisenä tilana. Toisin on CMOS-toteutuksessa, jossa painokertoimien päivitys pitää tehdä erillisellä algoritmilla. Päivitettyjen kertoimien laskeminen sitoo paljon laskentatehoa, ja laskettujen kertoimien tallennus pitää tehdä erilliseen muistiyksikköön [1].

4 Yhteenveto

Memristorin käsitettä tarkennettiin jakamalla se *ideaaliseen* ja *laajennettuun* memristoriin. Näiden termien erottaminen auttaa ymmärtämään eroa todellisten laitteiden ja teoreettisen konseptin välillä. Teoreettisilla määritelmillä ei ole sinällään merkitystä, kun pyritään kehittämään käytännön sovelluksiin soveltuvia laitteita, jolloin toimivuus ja halutut ominaisuudet menevät etusijalle. On kuitenkin hyvä tuntea myös memristorin käsitteen alkuperä.

Memristoritekniologia on lupaava kandidaatti tulevaisuuden tietotekniikan sovelluksiin. Memristoritekniikkaa voidaan liittää nykyisen CMOS-tekniikan yhteyteen, ja joissain sovelluskohteissa memristorit pystyvät korvaamaan CMOS-tekniikan jopa täysin. Memristoreilla on omalaatuisia erityispiirteitä, joita ei löydy mistään muusta yksittäisestä piirikomponentista. Nämä piirteet on tunnistettu sopivan erityisen hyvin mm. neuroverkkosovelluksiin. Tällä hetkellä suurin memristorien maailmanvalloitusta hidastava seikka onkin niiden toiminnan epävarmuus ja vaikeus tuottaa tasalaatuisia komponentteja [10]. Vuotovirtaongelman kaltaiset toteutukseen liittyvät ongelmat pystytään varmasti ratkomaan erilaisilla rakenneratkaisuilla.

On hyvin mahdollista, että jokin esitellyistä RS-mekanismeista ja memristorityypeistä yleistyy tulevaisuudessa standardityypiksi, mikäli ratkaiseva läpimurto käytännön sovelluksia vaivaaviin ongelmiin löydetään. On silti hyvä, että tutkimusta tehdään laajasti useiden erilaisten mekanismien parissa. Tällöin mahdollisuus löytää ratkaisu memristorien suurimpiin ongelma-kohtiin on todennäköisempää, kuin luottamalla vain jonkin tietyn mekanismin ylivertaisuuteen.

Viitteet

- [1] W. Chen, L. Song, S. Wang, Z. Zhang, G. Wang, G. Hu ja S. Gao, *Advanced Electronic Materials* **9**, 2200833 (2023).
- [2] L. O. Chua, *IEEE Transactions on Circuit Theory* **18**, 507 (1971).
- [3] D. B. Strukov, G. Snider, D. R. Stewart ja R. S. Williams, *Nature* **453**, 80 (2008).
- [4] D. Ielmini, *Microelectronic Engineering* **190**, 44 (2018).
- [5] M. Zidan, J. P. Strachan ja W. Lu, *Nature Electronics* **1**, 22–29 (2018).
- [6] S. Vongehr, *Scientific Reports* **5**, 11657 (2015).
- [7] E. Gale, *physica status solidi (a)* **212**, 229 (2015).
- [8] L. O. Chua ja S.-M. S. Kang, *Proceedings of the IEEE* **64**, 209 (1976).
- [9] L. Chua, G. Sirakoulis ja A. Adamatzky, *Handbook of Memristor Networks* (Springer Cham, 2019).
- [10] V. Lähteenlahti, *Memristor devices based on low-bandwidth manganites* (University of Turku, 2022).
- [11] J. S. Lee, S. Lee ja T. W. Noh, *Applied Physics Reviews* **2**, (2015).
- [12] A. Sawa, *Materials Today* **11**, 28 (2008).
- [13] M. L. Gallo ja A. Sebastian, *Journal of Physics D: Applied Physics* **53**, 213002 (2020).
- [14] T. Kawahara, K. Ito, R. Takemura ja H. Ohno, *Microelectronics Reliability* **52**, (2012).
- [15] G. Pedretti ja D. Ielmini, *Electronics* **10**, 1063 (2021).
- [16] H. Päivi, H. Mervi, S. Hannu, S. Panu, T. Antero, T.-U. Marja ja V. Juha, *Bios 4 Ihmisen Biologia* (Sanoma Pro, 2014).