

Teemu Rinne

# KILPARATA- JA KUPLAMUISTIN TEKNOLOGIAT JA VERTAILU

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Sakari Lahti  
Ohjaajat: Sakari Lahti, Joonas Multanen  
Toukokuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Teemu Rinne: Kilparata- ja kuplamuistin teknologiat ja vertailu  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma  
Huhtikuu 2023

---

Kun teknologia kehittyy ja tallennettava datan määrä kasvaa vain kiihtyvällä tahdilla, on tallennusteknologian pystyttävä vastamaan muutoksiin. Kilparatamuisti (engl. Racetrack Memory) on eräs lupaava muistitekнологia, jolla voitaisiin saada huomattaviakin parannuksia verrattuna tämän päivän kaupallisiin muisteihin. Lupaavan kilparatamuistista tekee se, että sillä voidaan mahdollisesti saavuttaa tietokoneen keskusmuistin luku- ja kirjoitusnopeudet sekä massamuistin tallennuskapasiteetti. Monta vuosikymmentä sitten markkinoilla nähtiin samankaltainen ja samoja odotuksia antanut kuplamuisti (engl. Bubble Memory). Työn tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus kyseisten muistien ominaisuuksiin sekä vertailla niitä ja samalla pohtia voisiko vanhoista kuplamuistitutkimuksista löytyä mahdollisuuksia kilparatamuistille.

Työn alussa tarkastellaan kilparatamuistille kehitettyjä ominaisuuksia. Muistissa data tallennetaan magneettisina alueina nanojohtimille ja johtimilla dataa siirretään edestakaisin luku- ja kirjoitusoperaatioiden mukaan. Kilparatamuistille on tullut useita ratkaisuja sen eri ominaisuuksille sen jälkeen, kun Stuart Parkin esitteli teknologian 20 vuotta sitten. Huonoimmat ratkaisut on karsittu ja parhaimpien kehittämistä on jatkettu, mutta markkinoille asti kilparatamuisti ei ole vielä päässyt. Seuraavaksi työssä käsitellään 1970-luvulla Andrew Bobeckin esittelemää kuplamuistia. Kuplamuisti myös hyödynsi tallennuksessa magneettisia alueita ja dataa siirrettiin sarjoina luku- ja kirjoituselementeille. Myös kuplamuistin ominaisuuksille tuli erilaisia ratkaisuja. Melko nopeasti kuplamuistille saatiin kaupallisia tuotteita useammalta teknologiayritykseltä, mutta liian suurten kustannusten ja kilpailevien teknologioiden takia se hävisi lähes täysin 1980-luvulla.

Muistien ominaisuuksia vertaillaessa voidaan huomata, että niissä on paljon samaa, vaikka välissä onkin useampi vuosikymmen aikaa. Eroja myös löytyy, kuten esimerkiksi tallennukseen käytettävien magneettisten alueiden koko on saatu kutistettua sadasosaan. Kuitenkaan kilparatamuistin tutkimuksissa ei ole juurikaan otettu huomioon kuplamuistin vanhoja tutkimuksia. Jatkotutkimuksissa voisikin olla aiheellista tutkia tarkemmin, että löytyisikö kilparatamuistin kaupallistumista hidastaville haasteille ratkaisuja kuplamuistin tutkimuksista.

Avainsanat: Kilparatamuisti, Racetrack Memory, Kuplamuisti, Bubble Memory

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. KILPARATAMUISTI.....	2
2.1 Kilparatamuistin periaate .....	2
2.2 Datan ilmentäminen kilparadoilla .....	3
2.3 Datan siirto kilparadalla .....	5
2.4 Muistiin kirjoitus .....	7
2.5 Muistista lukeminen .....	9
2.6 Kilparatamuisti markkinoilla .....	9
3. KUPLAMUISTI.....	11
3.1 Kuplamuistin periaate .....	11
3.2 Datan ilmentäminen granaattikalvolla .....	11
3.3 Datan siirto granaattikalvolla.....	13
3.4 Datan kirjoitus ja luku .....	17
3.5 Kuplamuisti markkinoilla .....	18
4. VERTAILU JA KUPLAMUISTIN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET .....	20
5. YHTEENVETO .....	23
LÄHTEET .....	24

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Kilparatamuistin rakenne kaksi- ja kolmiulotteisena, sekä luku- ja kirjoituselementit. Muokattu lähteestä [2].</i>	3
<b>Kuva 2.</b>	<i>DW-muotoja pehmeissä ja kovissa ferromagneettisissa materiaaleissa. Muokattu lähteestä [5].</i>	4
<b>Kuva 3.</b>	<i>Skyrmionin (a) Bloch- ja (b) Neel-rakenteet. [7].</i>	5
<b>Kuva 4.</b>	<i>DW siirtäminen STT:n avulla alkaen alkupaikasta <math>x_0</math> päätyen uuteen paikkaan <math>x_1</math> (a-c). Muokattu lähteestä [8].</i>	6
<b>Kuva 5.</b>	<i>Kuvattuna DW siirto SOT:lla. Muokattu lähteestä [8].</i>	7
<b>Kuva 6.</b>	<i>Kilparatamuistille kehitettyjä kirjoitusmenetelmiä. Muokattu lähteestä [5].</i>	8
<b>Kuva 7.</b>	<i>Kuvattuna ulkoisen magneettikentän vaikutus granaattikalvon magneettisuuteen. Muokattu lähteestä [12].</i>	12
<b>Kuva 8.</b>	<i>Kuplan seinän mahdollisia rakenteita. Muokattu lähteestä [12].</i>	13
<b>Kuva 9.</b>	<i>Yksinkertaistettu kuva kuplan siirrosta magneettisilla T- ja I-palkeilla. Kuvassa ympyrä tarkoittaa kuplaa magneettisella kalvolla ja nuoli tarkoittaa kalvon pinnan suuntaista ulkoista magneettikenttää. Muokattu lähteestä [11].</i>	14
<b>Kuva 10.</b>	<i>Kuvassa esitettynä kuplamuistille yleinen pää- ja sivusilmukoiden ratkaisu. Muokattu lähteestä [14].</i>	15
<b>Kuva 11.</b>	<i>Kuvattuna kuplien siirtomenetelmät T-I-palkkiyhdistelmällä (a) ja auran muotoisilla palkeilla (b). Muokattu lähteestä [12].</i>	16
<b>Kuva 12.</b>	<i>Ioni-istutuksella muodostettu kuplien siirtorata kranaattikristallikalvolle. Muokattu lähteestä [16].</i>	17
<b>Kuva 13.</b>	<i>Kuvattuna kuplaydingeneraattori (a) ja kuplan lukuelementti (b). Muokattu lähteestä [12].</i>	18

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

AHE	epänormaali Hall-efekti (engl. Anomalous Hall effect)
AMR	anisotrooppinen magnetoiresistivisyys (engl. Anisotropic Magnetoresistance)
BM	kuplamuisti (engl. Bubble Memory)
bit	bitti
DW	magneettisten alueiden välinen seinä (engl. domain-wall)
GMR	suurimagnetoiresistivisyys (engl. Giant Magnetoresistance)
IBM	teknologiayritys (International Business Machines Corporation)
IMA	tason suuntainen magneettinen anisotropia (engl. In-plane Magnetic Anisotropy)
MTJ	magneettinen tunneliliitos (engl. Magnetic Tunnel Junction)
RT	kilparata (engl. racetrack)
RTM	kilparatamuisti (engl. Racetrack Memory)
STT	spin siirtomomentti (engl. Spin-Transfer Torque)
SOT	spinin kiertoradan momentti (engl. Spin-Orbit Torque)
TMR	tunnelimagnetoiresistivisyys (engl. Tunnel Magnetoresistance)
t	tavu

# 1. JOHDANTO

Teknologian kehittyessä ympärillämme kiihtyvällä nopeudella ja samalla tallennettavan datan määrän lisääntyessä, on tallennusteknologian pysyttävä kehityksen perässä ja pystyttävä suurempiin nopeuksiin ja tallennuskapasiteetteihin. Nykyisissä tietokoneissa muistit on jaettu prosessoriin integroituun välimuistiin, keskusmuistiin ja massamuistiin. Erityisesti nopeille ja virtaa syöville keskusmuisteille, joille talletetaan suorituksessa oleva ohjelma, sekä kaiken muun säilöville, haihtumattomille ja hitaille massamuisteille tulee jatkuvasti markkinoille hieman nopeampia ja suurempia versioita kuin edellinen. Ihannetapauksessa keskusmuistin ja massamuistin hyvät puolet yhdistettäisiin ja huonot puolet karsittaisiin, sekä saataisiin molemmat muistitasot yhdistettyä. Vielä ei ole kuitenkaan saatu molempien asemaa korvaavaa muistityyppiä markkinoille.

Magneettisia nanojohtimia hyödyntävä kilparatamuisti on eräs muistiteknologia, jolla voisi olla mahdollista korvata kuvatut muistityypit. Kilparatamuistissa yhdistyy keskusmuistin ja massamuistin hyvät puolet. Kilparatamuistista voi mahdollisesti saada yhtä nopean tai jopa nopeamman kuin keskusmuistista, koska se ei käytä kirjoitukseen ja lukemiseen liikkuvia osia kuten jotkin massamuistit. Kilparatamuistin magneettisten ja peräkkäisten alueiden hyödyntäminen taas mahdollistaa massamuisteihin verrattavissa olevan tallennuskapasiteetin ja tiedon häviämättömyyden. Kymmeniä vuosia sitten kehitetyllä kuplamuistilla on lähes samanlainen idea kuin kilparatamuistilla. Kuplamuistissa dataa ilmentäviä magneettisia kuplasarjoja siirretään magneettisella kalvolla edestakaisin, kuten kilparatamuistissa magneettisia alueita nanojohtimella. Työn tavoitteena on tutkia, millaisia toteutuksia on kehitetty kilparata- ja kuplamuistien teknologioille tähän mennessä. Lisäksi muistiteknologioita vertaillaan keskenään ja samalla pohditaan voisiko kuplamuistin toteutuksista löytyä apua kilparatamuistin haasteisiin.

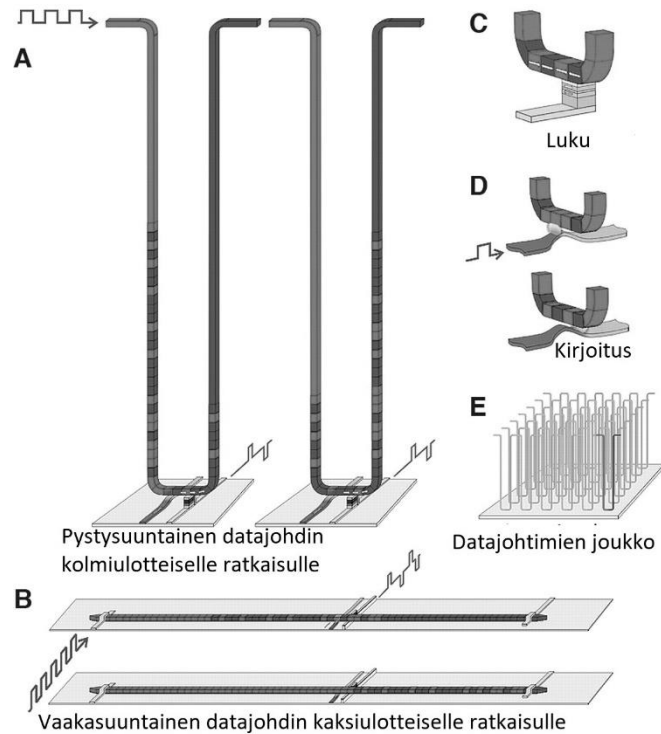
Työn alussa tarkastellaan muistien teknologioita. Luvussa 2 kuvataan kilparatamuistin rakennetta ja toimintaa. Luvussa 3 kuvataan kuplamuistin teknologiaa. Luvussa 4 verrataan muisteja keskenään ja pohditaan mahdollisuuksia hyödyntää vanhempaa muistiteknologiaa uudemmassa. Lopuksi tehdään yhteenveto työssä käsitellyistä asioista.

## 2. KILPARATAMUISTI

### 2.1 Kilparatamuistin periaate

Kilparatamuistin, eli Racetrack Memory (RTM), idean kehitti ja patentoi teknologiayritys IBM:n (International Business Machines Corporation) tutkija Stuart Parkin vuonna 2004 [1]. Kilparatamuisti tarvitsee edelleen kehitystä päästäkseen markkinoille, mutta se on lupaava muistitekniologia sen datan tallennustiheyden, mahdollisten siirtonopeuksien ja datan häviämättömyyden ansiosta. Kilparatamuisti ainakin tallennustiheyden puolesta olisi mahdollinen nykyisten massamuistitekniologioiden syrjäyttäjä ja mahdollisesti myös korvaajaksi datansa hävittäville keskusmuisteille.

Kilparatamuistiin tallennus tapahtuu hyvin ohuisiin nanometriluokkaa oleviin johtimiin, niin kutsuttuihin kilparatoihin (racetrack, RT), mistä muisti saakin nimensä. Kilparatoihin databitit asetetaan magneettisiin alueisiin vierekkäin. Bittien kirjoitus tapahtuu johtimien lähelle asetetulla kirjoituselementillä (kuva 1D), joka kääntää elementin kohdalla olevan data-alueen magneettisuuden toisin päin. Magneettisuuden suunta ilmentää databitin arvoa. Bitin lukeminen johtimesta tapahtuu sille tarkoitetulla lukeelementillä (kuva 1C), joka muuntaa magneettisen alueen suunnan sähköisesti luettavaan muotoon. Johtimessa olevia data-alueita siirretään lukemista tai kirjoitusta varten syöttämällä johtimen läpi sähkövirtaa.



**Kuva 1.** Kilparatamuistin rakenne kaksi- ja kolmiulotteisena, sekä luku- ja kirjoitus-elementit. Muokattu lähteestä [2].

## 2.2 Datan ilmentäminen kilparadoilla

Data tallennetaan bitteinä magneettisiin alueisiin johtimille, jotka ovat nanometrien kokoisia. Alueen magneettisuuden suunta osoittaa bitin arvon '0' tai '1' ja erisuuntaisten magneettisten alueiden välistä tilaa kutsutaan alueseinäksi (domain-wall, DW). Data-alueita on kehitetty kahdenlaisina, nanojohtimen poikkipinta-alan kattavina alueina ja pyöreisinä alueina, niin kutsuttuina skyrmioneina.

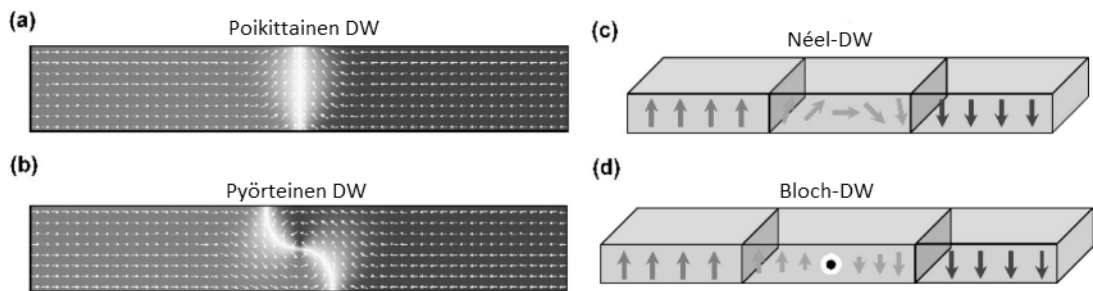
Kilparatamuisteista voidaan tehdä kaksi- tai kolmiulotteisia sen mukaan, miten kilparadat eli nanojohtimet muodostetaan. Tekemällä kilparatamuistista kolmiulotteinen, saadaan muistin tallennustiheyttä kasvatettua. Nanojohtimista tekemällä esimerkiksi pystyyn asetettuja ja U-muotoisia (kuva 1A), voidaan johtimien pituutta kasvattaa tasosta ylöspäin [2]. Pystyyn asetetun nanojohtimen ympärille jää nyt myös enemmän tilaa ja niitä voidaan asettaa useampia vierekkäin, esimerkiksi matriisin tapaan (kuva 1E). Kaksiulotteisena johtimet asetetaan vierekkäin vaakatasoon ja siten jää käyttämättä kokonaan yksi ulottuvuus (kuva 1B). Vaakatasoon levitettyinä johtimien pituudet myös vievät yhdeltä suunnalta paljon tilaa.

Nanojohtimet valmistetaan ferromagneettisista materiaaleista. Ferromagneettinen materiaali on metalli tai seos metalleja, jotka aiheuttavat materiaalin voimakkaan vuorovaiku-



tuksen magneettisten esineiden kanssa. Voimakas vuorovaikutus on seurausta materiaalin atomien järjestäytymisestä rinnakkain samansuuntaisesti niiden magneettisen momentin mukaan [3]. Kilparatamuistissa bittejä ilmennetään juuri atomien magneettisuuksien suunnalla. Kilparatoihin käytettyjä metalleja ovat esimerkiksi rauta, nikkeli, koboltti, platina ja palladium [4].

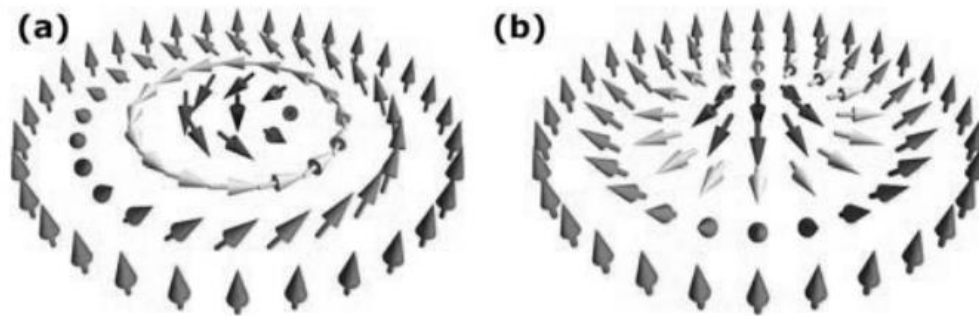
Riippuen nanojohtimen materiaalista bittejä ilmentävien alueiden atomien magneettisuuden suunta voi olla johtimen pituuden tai leveyden suuntaisia. Pehmeäksi kutsutulla ferromagneettisella materiaalilla magneettisuus on johtimen kanssa pituussuunnassa. Pehmeys viittaa materiaalin pieneen anisotropiaan eli materiaalin pieneen riippuvuuteen sen rakenneosien suunnasta. Tällaisen materiaalin DW voidaan luokitella kahdella tavalla, sen erottamien alueiden magneettisuuksien suuntien mukaan ja sen mukaan minkä muotoinen DW muodostuu (kuva 2 a, b). Kun luokitellaan alueet magneettisuuden suunnan mukaan, DW voi olla hännästä häntään, jossa alueiden suunnat ovat poispäin toisistaan, tai päästä päähän eli alueiden suunnat ovat toisiaan vastaan. Kun taas luokitellaan DW:n muodon mukaan, voi se olla poikittainen tai pyörteinen. Poikittaisessa DW:ssa atomien magneettisuuden suunta vaihtuu rajakohdassa kääntyen ensin poikittain suhteessa johtimeen ja siitä vastakkaiseen suuntaan kuin oli aluksi (kuva 2a). DW voi olla myös pyörteinen eli alueiden erisuuntaiset magneettisuudet aiheuttavat atomien välisen pyörteen myötä- tai vastapäivään (kuva 2b). Pyörteen magneettinen keskus on kohtisuorassa johtimen pituutta vastaan. [4] [5]



**Kuva 2.** DW-muotoja pehmeissä ja kovissa ferromagneettisissa materiaaleissa. Muokattu lähteestä [5].

Kovaksi kutsutulla ferromagneettisella johdinmateriaalilla on voimakkaampi anisotropia. Tällaisissa materiaaleissa alueiden magneettiset suunnat ovat poikittain suhteessa johtimen pituuteen. [4] Poikittaisten magneettisten alueiden välinen DW voidaan havaita kahdenlaisena, sen mukaan miten alueiden välillä magneettisuuden suunta kääntyy toiseksi. Magneettisuuden kääntyessä johtimen pituussuunnan kautta, kutsutaan seinää Néel-seinäksi (kuva 2c) ja magneettisuuden kääntyessä johtimen leveysuunnassa, kutsutaan seinää Bloch-seinäksi (kuva 2d) [6, katso 5].

Uudempana tutkimuskohteena on ilmentää bittejä pyörteisinä alueina eli skyrmioneina (kuva 3). Kilparatamuistin kehittäminen skyrmioneja käyttäen on herättänyt mielenkiintoa tutkijoissa pääasiassa siitä syystä, että sillä on mahdollista päästä vielä suurempaan tallennustiheyteen kuin koko nanojohtimen poikkipinta-alan kattavilla alueilla. Tutkimusten mukaan skyrmioneilla voidaan päästä muutamien nanometrien kokoluokkaan, kun DW:n erottamilla alueilla päästään 30–40 nm. Skyrmioneita käytettäessä nanojohdinten materiaalin magneettisuus on poikittaista johtimen pituuden suhteen ja skyrmioneita on siten kahdenlaisia riippuen, miten magneettisuus kääntyy alueiden välillä. Skyrmioneja nimitetään Bloch-skyrmioneiksi ja Neel-skyrmioneiksi, kuten aiemmin esitetyillä poikittaisen magneettisuuden DW:lla (kuva 2c ja d). Jos skyrmion on Bloch-tyyppinen, alueen magneettisuus kääntyy skyrmionin reunan suhteen samassa suunnassa, kuten kuvassa 3a. Neel-tyyppillä taas magneettisuus kääntyy skyrmionin reunan suhteen kohtisuorasti, kuten kuvassa 3b. Aivan skyrmionin keskellä magneettisuuden suunta on täysin vastakkaisuuntainen verrattuna sitä ympäröivään alueeseen. [7]



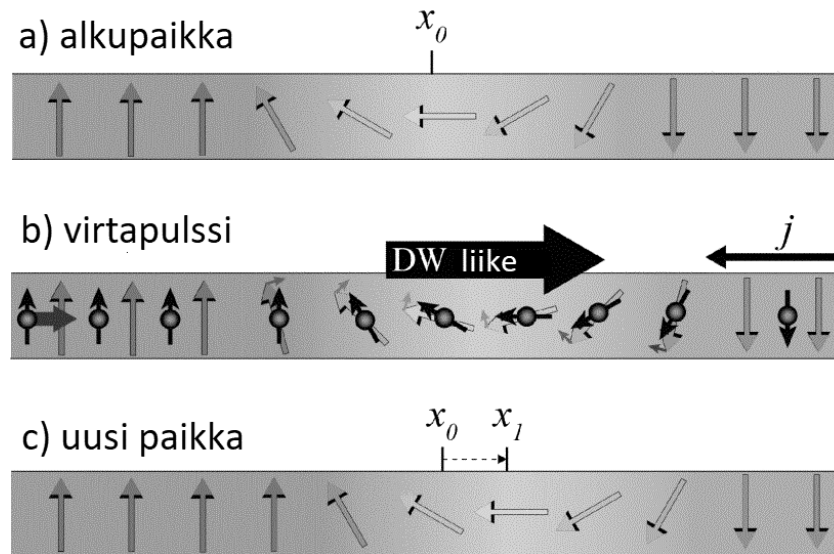
**Kuva 3.** Skyrmionin (a) Bloch- ja (b) Neel-rakenteet. [7]

### 2.3 Datan siirto kilparadalla

Tärkeä ominaisuus kilparatamuistille on sen data-alueiden siirtäminen nanojohtimella. Niitä siirrellään edestakaisin, jotta dataa voidaan lukea ja kirjoittaa johtimen läheisyyteen asetetulla luku- tai kirjoituselementillä. Alueiden siirto on merkittävä tekijä kilparatamuistin luku- ja kirjoitusnopeuksien määrittelyssä. Siirtomenetelmiä on kehitetty erilaisia ja soveltuvimmaksi on osoittautunut alueiden siirto syöttämällä sähkövirtaa suoraan nanojohtimeen. Sähkövirta saa aikaan alueeseinien yhtäaikaisen siirtymisen virran myötäisesti tai sitä vastaan. Siirto voidaan myös tehdä ulkoisen magneettikentän avulla, mutta sen monimutkaisuuden takia sähkövirta on todettu paremmaksi tavaksi.

Ulkoisella magneettikentällä data-alueita työnnetään hyödyntäen eri suuntaisia magneettisuuksia ja alueiden siirtonopeutta säädetään magneettikentän voimakkuuden avulla. Tutkimuksissa on huomattu, että siirtonopeuden muutos ei ole lineaarista, kun magneettikentän vahvuutta kasvatetaan. Epälineaarisuuden takia alueiden liikkuvuus

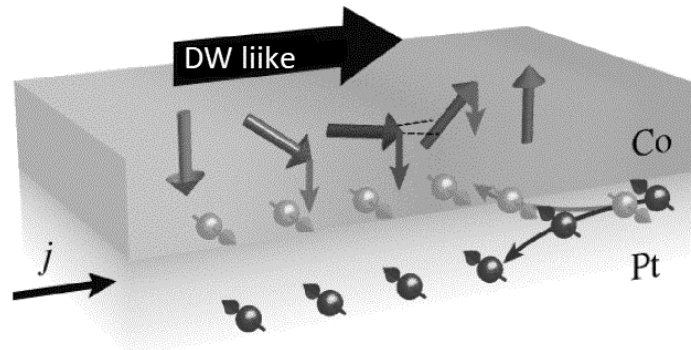
voidaan jakaa kolmeen alueeseen siirtonopeuden muutoksen mukaan. Matalan magneettikentän vahvuuden alueella siirtonopeus nousee lineaarisesti, kunnes vahvuus saavuttaa tietyn pisteen, jota kutsutaan Walker-alueeksi. Kun magneettikentän vahvuus on ylittänyt Walker-alueen, alueseinät alkavat jaksollisesti muuttumaan Bloch- ja Neel-seinän välillä, mitä kutsutaan Walker-hajoamiseksi. Walker-hajoamisen seurauksena data-alueiden siirtonopeus pienenee magneettikentän kasvaessa. Magneettikentän vahvuuden kasvaessa tarpeeksi suureksi, Walker-hajoamisen vaikutus pienenee siten, että alueiden nopeus alkaa kasvamaan. [5]



**Kuva 4.** DW siirtäminen STT:n avulla alkaen alkupaikasta  $x_0$  päättyen uuteen paikkaan  $x_1$  (a-c). Muokattu lähteestä [8].

Kun sähkövirtaa syötetään suoraan ferromagneettiseen kilparataan, data-alueet siirtyvät virran elektroneiden spin-ominaisuuden aiheuttamasta vuorovaikutuksesta (kuva 4). Elektronin spin on kvanttifysiikalla selitettävä arvo, joka määrittää elektronin magneettisuuden suuntaa. Syötetyn sähkövirran elektronit kääntyvät saman suuntaisesti ensimmäisen kohtaamansa data-alueen magneettisuuden kanssa. Virtaavien elektronien kohdatessa erisuuntaista magneettisuutta, eli kilparadalla alueseinän (Domain-Wall, DW), aiheutuu elektroniin kulmamomenttia (kuva 4b). Kulmamomentti pyrkii kääntämään elektronin suuntaa alueen magneettisuuden kanssa samansuuntaiseksi. Myös elektroni vaikuttaa samoin alueen magneettisuuteen, mikä aiheuttaa alueiden magneettisuuksien kääntymistä. Virran kääntyneet elektronit jatkavat liikettään, kunnes taas kohtaavat seuraavan alueseinän. [5] Ilmiö aiheuttaa alueseinien ja siten data-alueiden siirtymisen elektronivirran suuntaisesti. Elektronien virratessa sähkövirtaa vastaan, siirtyvät siis myös alueet sähkövirtaan nähden vastakkaiseen suuntaan. Vastakkaiset suunnat voi-

daan havaita kuvan 4 kohdasta b, jossa DW liike ja sähkövirta  $j$  ovat vastakkain. Siirtämiseen käytettyä ilmiötä kutsutaan kirjallisuudessa Spin-Transfer Torque (STT), eli suomennettuna spin-siirtomomentti.



**Kuva 5.** Kuvattuna DW siirto SOT:lla. Muokattu lähteestä [8].

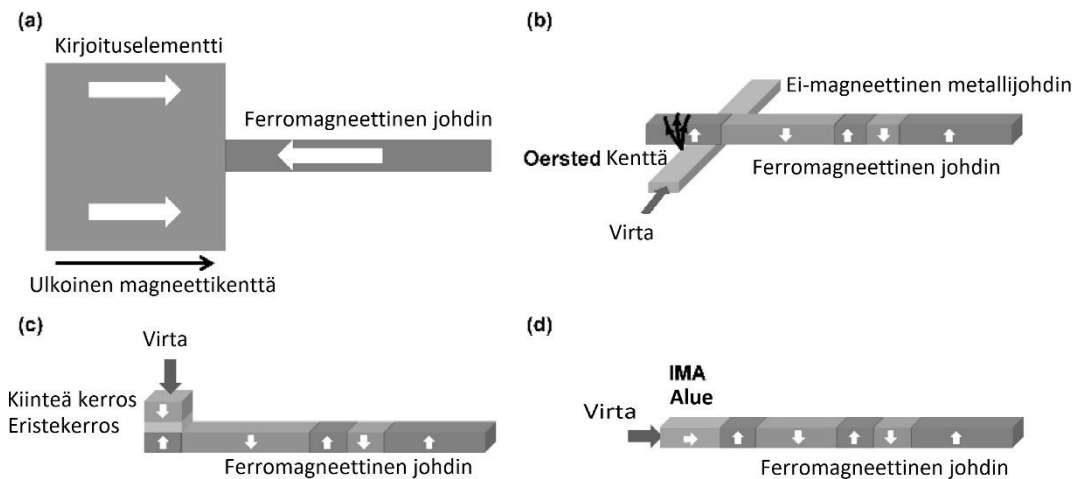
Toinen sähkövirralla toteutettu siirtotapa hyödyntää myös elektroneiden spiniä ja magneettisuutta. Siirtotapaa soveltava kilparata koostuu rinnakkain asetetuista raskasmetallijohtimesta, joka on esimerkiksi platinaa (kuva 5), sekä ferromagneettisesta johtimesta. Raskasmetallijohtimeen syötetty sähkövirta aiheuttaa elektronien järjestäytymisen raskasmetallijohtimen eri päihin elektronien spin-arvon mukaan. Spinien mukaan järjestäytyneet elektronit saavat aikaan raskasmetallijohtimeen puhtaasti saman suuntaisten elektronien virran. Syntyneen elektronivirran elektronit aiheuttavat vääntömomenttia kilparadan ferromagneettisen osan magneettisuuksiin, jotka poikkeavat elektronivirran magneettisuudesta. Magneettisuuden kokeman momentin takia kilparadan alueseinät ja siten data-alueet liikkuvat. STT:stä poiketen alueet liikkuvat nyt syötetyn sähkövirran suuntaisesti, mikä voidaan havaita kuvasta 5, missä sähkövirta  $j$  ja DW liike osoittavat samaan suuntaan. Siirtotapa on vielä tuore tutkimuskohde, mutta sen on todettu olevan merkittävästi energiatehokkaampi ja nopeampi kuin muut siirtotavat. [5] Kyseistä siirtomenetelmää kutsutaan spinin kiertoradan momentiksi (Spin-Orbit Torque, SOT).

## 2.4 Muistiin kirjoitus

Myös datan kirjoituksessa voidaan käyttää hyödyksi erillistä magneettikenttää tai sähkövirtaa, niin kuin data-alueiden siirrossa käytettiin. Magneettikentällä kirjoitusta on tutkittu pituussuuntaisesti magneettisuudeltaan järjestäytyneillä materiaaleilla. Datajohtimen päähän asetettuun kirjoituselementtiin luodaan ulkoisen magneettikentän avulla halutun suuntainen magneettisuus (kuva 6a). Kirjoituselementin magneettisen alueen ja datajohtimen seuraavan vastakkaisuuntaisen alueen väliin muodostuu alueseinä (Domain Wall, DW). Siirtämällä alue datajohtimen suuntaan, saadaan kirjoitettua haluttu databitti muistiin. Ulkoisen magneettikentän käyttö kirjoituksessa tarvitsee paljon virtaa ja se voi

vaikuttaa viereisiin datajohtimiin. Kyseisistä syystä magneettikentän käyttö ei ole käytännöllistä. [5]

Potentiaalinen tapa kirjoittaa dataa kilparadalle on käyttää magneettista tunneliliitosta (Magnetic Tunnel Junction, MTJ), jonka läpi syötetään sähkövirtaa (kuva 6c). MTJ koostuu kiinteään magneettisuuden tasosta, vapaan magneettisuuden tasosta ja edellisten tasojen eristävästä kerroksesta. Kiinteän magneettisuuden taso toimii suodattimena sähkövirran elektroneille. Taso siis päästää lävitseen elektroneita, joilla on saman suuntainen magneettisuus ja suodattaa eri suuntaiset elektroneita. Läpäisseet elektroneit jatkavat eristekerroksen läpi vapaan magneettisuuden tasolle, joka kilparatamuistin kohdalla on datajohtimen data-alue. Sähkövirran elektroneit aiheuttavat nyt alueen vastakkaissuuntaiseen magneettisuuteen vääntömomenttia kääntäen alueen magneettisuuden halutun suuntaiseksi ilmentämään oikeaa bittiarvoa. [5] Kyseinen kirjoitustapa hyödyntää samaa ilmiötä kuin alueiden siirtoon käytettyä spin-siirtomomenttia (Spin-Transfer Torque, STT).



**Kuva 6.** Kilparatamuistille kehitettyjä kirjoitusmenetelmiä. Muokattu lähteestä [5].

Toinen sähkövirtaa käyttävä kirjoitustapa on käyttää sähkövirran synnyttämää Oersted-kenttää. Tässä asetetaan erillinen metallijohto risteämään datajohdon ylä- tai alapuolelta (kuva 6b). [5] Sähkövirran synnyttämä Oersted-kenttä aiheuttaa risteyskohdassa vääntömomenttia data-alueen magneettisuuteen ja kääntäen sen halutun suuntaiseksi. Kyseinen ilmiö on sama kuin siirrossakin käytetty spinin kiertoradan momentti (Spin-Orbit Torque, SOT). [9] Kuitenkin STT:llä toteutettu kirjoitus on tehokkaampi ja vähemmän tilaa vievä kuin Oersted-kentällä [5].

## 2.5 Muistista lukeminen

Kilparadan data-alueen lukemiseen käytetään kirjoituksen tapaan kolmikerroksista magneettista tunneliliitosta (MTJ) (kuva 6c). MTJ:lla lukemisessa hyödynnetään tunnelimagneto-resistiivisiä (Tunnel Magnetoresistance, TMR) ja suurimagneto-resistiivisiä (Giant Magnetoresistance, GMR) ilmiötä. Mikroskooppisessa tarkastelussa ilmiöt eroavat toisistaan, mutta datan lukuun kilparadalta ne käyttäytyvät hyvin samalla tavalla [4]. Lukeminen tapahtuu syöttämällä tunneliliitokseen sähkövirtaa, joka MTJ:n kiinteän magneettisuuden tason ansiosta sisältää vain tietyn magneettisuuden omaavia elektroneja. Syötettävä sähkövirta on paljon pienempi suhteessa kirjoitukseen käytettävään sähkövirtaan. Syötetyn sähkövirran elektronit reagoivat data-alueen magneettisuuteen riippuen siitä, onko alueen magneettisuus virran elektronien kanssa samansuuntaista vai vastakkaissuuntaista. Vastakkaissuuntaisten magneettisuuksien kohtaaminen voidaan havaita resistanssiarvoina niiden vuorovaikutuksesta toisiinsa. TMR-ilmiöllä on havaittu saavutettavan paljon suuremmat resistanssiarvot kuin GMR-ilmiöllä, minkä takia TMR on käytännöllisempi. [4] [8]

Kilparadan data-alueita voidaan havaita myös käyttämällä anisotrooppista magneto-resistiivisyyttä (anisotropic magnetoresistance, AMR) tai epänormaalia Hall-efektiä (anomalous Hall effect, AHE). AMR-ilmiö perustuu kilparadan läpi ajettavan sähkövirran ja alueen magneettisuuden väliseen kulmaan. AMR-ilmiö on siis herkkä alueseinille (DW), joissa tapahtuu alueiden välinen magneettisuuden kääntyminen. Ilmiöllä saadaankin luettua alueseinistä aiheutuvien signaalien yhteenlaskettu resistanssiarvo, eikä sillä saada tietoa data-alueiden suunnista eli bittiarvoista. AHE-ilmiö perustuu kilparadan poikki ajettuun jännitteeseen ja sillä voidaankin havaita alueen magneettisuuden suunta. AMR- ja AHE-ilmiöissä molemmissa resistanssiarvot jäävät hyvin pieniksi aiemmin esiteltyihin ilmiöihin verrattessa. AHE-ilmiöllä on myös vaikea toteuttaa lukuoperaatiota suurilla data-alueiden siirtonopeuksilla. [4]

## 2.6 Kilparatamuisti markkinoilla

Vaikka kilparatamuistiteknologian ensimmäisistä julkaisuista on jo noin 20 vuotta, ei markkinoilla ole nähty vielä kaupallista tuotetta. Niin kuin aiemmista luvuistakin käy ilmi, on kilparatamuistille kehitelty erilaisia menetelmiä tallentaa, siirtää, kirjoittaa ja lukea dataa. Silti löytyy vielä ratkaistavia ongelmia, kuten magneettisten data-alueiden stabiilius, kontrolloitu alueiden siirto nanojohtimella sekä virrankulutuksen optimointi, kuten data-alueiden edestakaisessa siirrossa [5].

Vuonna 2008 IBM:n tutkijat esittelivät toimivan 3-bittisen version kilparatateknologiaa käyttävästä rekisteristä. Demonstraatio koostui kolmesta nanojohtimesta ja kahdesta niiden kanssa kohtisuorasti risteävästä virtajohtimesta. Nanojohdinten magneettisuudet olivat johtimen pituussuunnassa järjestäytyneitä eli data-alueetkin olivat pituussuuntaisia. Bitin kirjoitus tapahtui syöttämällä toiseen virtajohtimeen tietyn suuntaista virtaa. Virran suunta riippui sillä hetkellä virtajohtimen kohdalla olevasta magneettisen alueen suunnasta. Samalla virralla voitiin myös siirtää nanojohtimen alueita eteenpäin ja jälleen kirjoittaa vaihtamalla syötettävän virran suuntaa. Kirjoitukseen käytettiin siis aiemmin esiteltyä Oersted-kenttää ja siirtoon spinin siirtomomenttia. Lukeminen tapahtui toisessa virtajohtimessa magnetoiresistiivisellä ilmiöllä aluseinän ohittaessa virtajohdin. [10] Jos kilparatamuisti pääsee markkinoille, mahdollisesti niillä voidaan päästä jopa 145 Tt kapasiteettiin tämän päivän 2,5 tuumaisen kovalevyn pakkauskoolla [5].

## 3. KUPLAMUISTI

### 3.1 Kuplamuistin periaate

Vuosikymmeniä sitten kehitetty kuplamuisti (Bubble Memory, BM) jakaa hyvin samanlaisia ominaisuuksia kuin edellä kuvattu kilparatamuisti, sekä sen odotukset olivat aikanaan samankaltaiset. Kuplamuistin odotettiin olevan tallennustiheydensä ja datan saavutettavuutensa ansiosta syrjäyttävä kiintolevymuisteille. Sen myös odotettiin olevan haastaja todella nopealle suorasaantimuistille, jonka kustannukset bittiä kohden olivat korkeat. Datan häviämättömyyden takia kuplamuisti herätti kiinnostusta käytettäväksi ilmailualan sovelluksissa. Magneettisten kuplien käyttämisestä muistiteknologiassa innostuttiin Andrew Bobeckin näytettyä elokuvan, jossa esiteltiin magneettisia kuplia tallennukseen hyödyntävästä siirtorekisterimuistista, Intermags-konferenssissa vuonna 1969. Bobeck oli Bell Labs-teknologiayhtiön tutkija ja hän oli ensimmäisiä kuplamuistiteknologian kehittäjiä. Kuplamuisti olikin monien yritysten kehityskohteena 1970- ja 1980-luvuilla. 1980-luvun lopulla Kuplamuisti kuitenkin hävisi lähes kokonaan, koska se ei enää pystynyt kilpailemaan muita markkinoille tulleita muistiteknologioita vastaan kustannuksissa ja teknologiassa. [11]

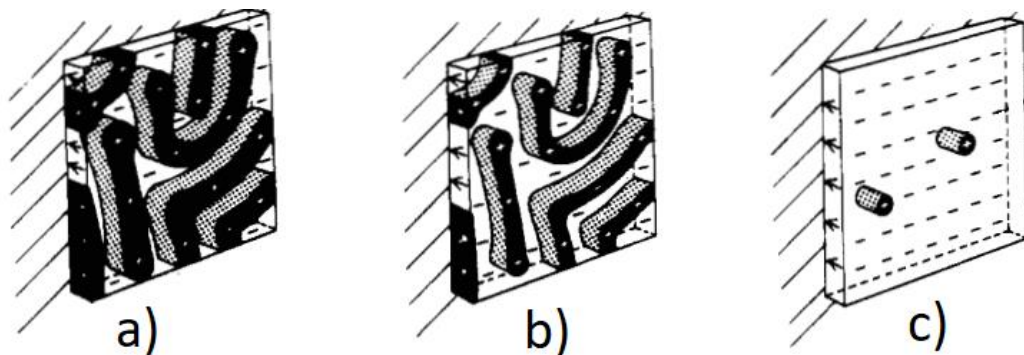
Kuplamuistiteknologia perustuu kilparatamuistin tavoin magneettisiin alueisiin, joiden magneettisuuden suunta osoittaa bitin arvoa. Magneettiset alueet eli kuplat muodostetaan magneettisesta materiaalista tehdylle kalvolle, jonka magneettisuus on järjestäytyneet kohtisuorasti suhteessa kalvon pintaan. Aluksi kalvot tehtiin orthoferriittisistä materiaaleista, mutta pian alettiin käyttää magneettisia granaattikalvoja, koska niillä pystyttiin muodostamaan paljon pienempiä kuplia ja siten kasvattamaan tallennustiheyttä [11]. Yleinen kuplamuistin rakenne on järjestää data-alueista pää- ja sivusilmukat magneettiselle kalvolle. Kuplia siirretään kalvoilla ulkoisen magneettikentän avulla.

### 3.2 Datan ilmentäminen granaattikalvolla

Kuplamuistissa data tallennetaan magneettisina alueina eli kuplina ohuelle magneettiselle kalvolle, yleensä granaattikristallikalvolle. Kuplan magneettisuus on vastakkaisuuntainen verrattuna ympäröivään alueeseen ja kupla tarkoittaa yleensä databitin arvoa '1'. Kuplan puuttuminen tarkoittaa bitin arvoa '0'. Myöhemmin luvussa voidaan huomata, että kuplalla on samoja ominaisuuksia kuin kilparadalla käytettävissä data-alueissa. Kuitenkin granaattikalvoilla on päästy vain noin  $0.5 \mu\text{m}$  eli  $500 \text{ nm}$  kokoluokkaan [11].



Ilman ulkoista magneettikenttää granaattikristallikalvon magneettisuus on järjestäytynyt siten, että ulkoisesti ei voida havaita sen magneettisuutta. Kalvon pinnan suhteen kohtisuorat magneettisuudet ovat satunnaisissa alueissa, joista puolet osoittavat pinnasta ylös ja puolet alaspäin (kuva 7a). Kohdistamalla kalvolle ulkoisen ja pinnan suhteen kohtisuoran magneettikentän alkavat magneettisuudet kääntyä enemmän magneettikentän suuntaisesti pienentäen vastakkaissuuntaisia alueita (kuva 7b). Tarpeeksi voimakkaalla ulkoisella magneettikentällä vastakkaissuuntaiset magneettisuudet kutistuvat pieniksi sylinterin muotoisiksi alueiksi eli kupliksi (kuva 7c). Kuplat pysyvät ennallaan kalvolla niin kauan, kunnes ulkoinen magneettikenttä otetaan pois vaikuttamasta. Ulkoinen magneettikenttä luodaan yleensä asettamalla kalvon läheisyyteen kestopagneetti. Sen ansiosta kuplamuisti on häviämätön muistityyppi. [12] [13]

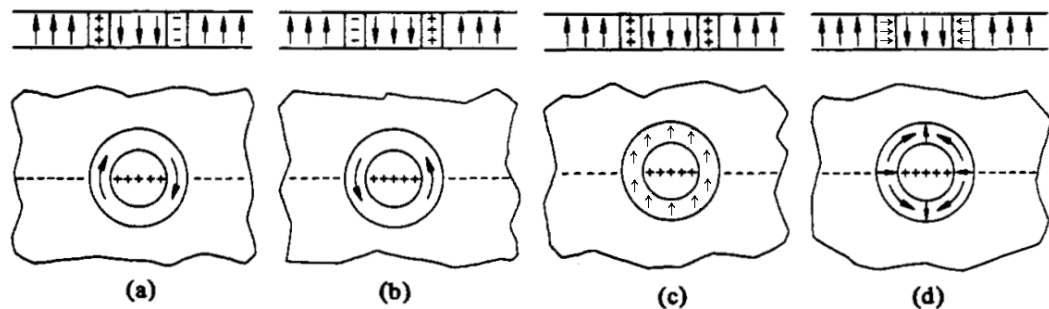


**Kuva 7.** Kuvattuna ulkoisen magneettikentän vaikutus granaattikalvon magneettisuuteen. Muokattu lähteestä [12].

Kuplaa ympäröivä seinä eli alue, jossa magneettisuudet vaihtuvat, on kuin poikittaisen magneettisuuden kilparatamuistilla. Normaali muoto kuplan seinälle on Bloch-seinä, jossa magneettisuus kääntyy kuplan seinän myötäisesti eli seinän kohtisuoran akselin ympäri (kuva 8 a ja b). Seinän keskivaiheella kääntyvän magneettisuuden ero vieressä oleviin alueisiin on 90 astetta. Kyseiseltä kohdalta katsottuna magneettisuus kiertää kuplaa yhtenäisesti myötä- tai vastapäivään. [12]

Kuplista voi kuitenkin muodostua niin kutsuttuja kovia kuplia seinän rakenteen mukaan. Kovan kuplan seinässä magneettisuus ei kierrä yhtenäisesti yhteen suuntaan. Esimerkiksi kuplan toisella puoliskolla seinän magneettisuus voi kiertää kuplaa myötäpäivään ja toisella puoliskolla vastapäivään. Kiertosuuntien törmäys- tai eriämiskohdassa magneettisuus kääntyy Neel-seinän tapaan eli kuplan seinän suhteen kohtisuorasti. Seinän epäyhdenmukaisuus voi olla jakautunut vielä pienempiin ja erisuuntaisiin osiin kuin esimerkissä. Kuvassa 8 kohdassa c) on kuvattuna yksinkertainen kovan kuplan seinä ja kohdassa d) on kuvattuna useampaan osaan jakaantuneen kuplan seinä. Epäyhtenäinen seinä vaikuttaa negatiivisesti kuplan stabiiliuteen ja liikkuvuuteen, minkä takia kovat

kuplat eivät ole toivottuja. Koviin kuplien vähentämiseksi on ehdotettu monikerroksista granaattikristallikalvoa, ioni-istutusta ja permalloy-kalvon asettamista granaattikalvolle. [12]

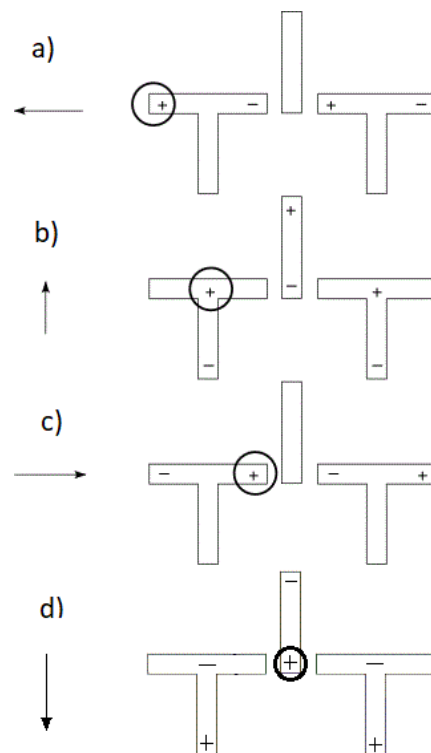


*Kuva 8. Kuplan seinän mahdollisia rakenteita. Muokattu lähteestä [12].*

### 3.3 Datan siirto granaattikalvolla

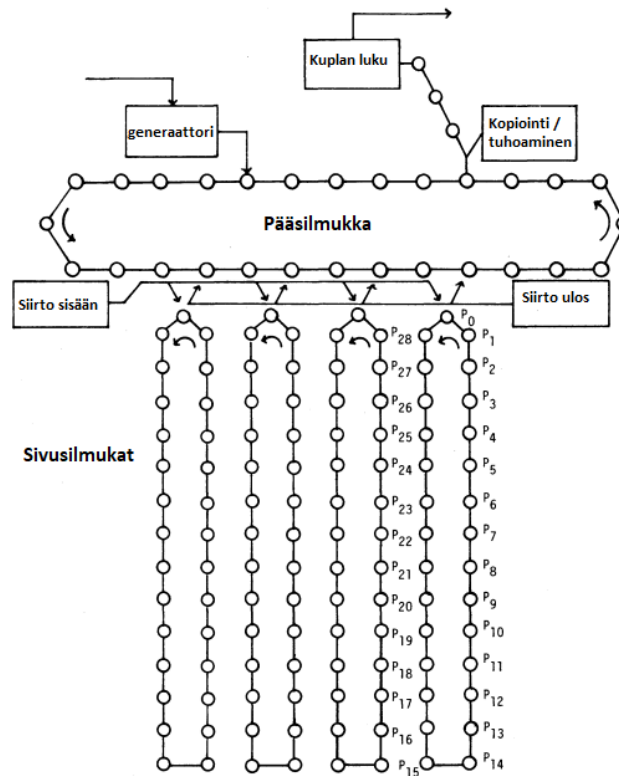
Kuplien siirto magneettisella kalvolla tapahtuu ulkoisella ja kalvon pinnan suuntaisella magneettikentällä, jota käännetään kalvon kohtisuoran akselin suhteen. Yksi tapa on käyttää ferromagneettisia T- ja I-muotoisten permalloy-palkkien sarjoja granaattikalvon päällä (kuva 9). Kalvon pinnan suuntainen magneettikenttä saa palkit magnetisoitumaan syötetyn magneettikentän suuntaisesti. Magnetisoituneen palkin läheisyydessä oleva kupla ajautuu palkin tiettyyn pätyyn riippuen minkä suuntainen magneettikenttä on luotu. Magneettikentän suuntaa kääntämällä 90 astetta myötä- tai vastapäivään, saadaan palkkien magneettisuuksia käännettyä ja sen mukana kuplaa siirrettyä, kuten esimerkiksi kuvan 9 kohtien a ja b välillä tapahtuu. Kun magneettikenttää on käännetty kokonainen kierros eli 360 astetta, on kupla siirtynyt yhden T- ja I-palkkiparin verran. Kuplan siirtäminen onnistuu eri suuntiin valitsemalla kumpaan suuntaan magneettikenttää kääntää. Kun magneettikenttää ei muuteta, pysyy kupla paikoillaan. Monta peräkkäin asetettua T- ja I-palkkiparia mahdollistaa usean kuplan asettumisen peräkkäin jonoon ja siten niiden samanaikaisen siirron. [13]

Myös muun muotoisten palkkien yhdistelmiä käytetään käännettävän magneettikentän kanssa, kuten Y ja I, T ja X tai auran muotoista palkkia. T ja I yhdistelmän lisäksi hyväksi vaihtoehdoksi on todettu etenkin auran muotoiset palkit. Usean vierekkäisen auran muotoisen palkin ansiosta kuplat venyvät leveyssuunnassa etenemissuunnan suhteen. Venytetyt kuplat helpottavat niiden havaitsemista lukuoperaatioissa ja kopioinnissa. Auroja käyttävän siirtorakenteen voi nähdä kuvassa 11b. Siirtomenetelmistä on tehty myös hybridimalleja, joissa eri muotoisia palkkeja yhdistellään. Näin saadaan eri menetelmien hyvät puolet hyödynnettyä, esimerkiksi seuraavissa kappaleissa esitellyissä ratojen välisissä siirroissa. [12]



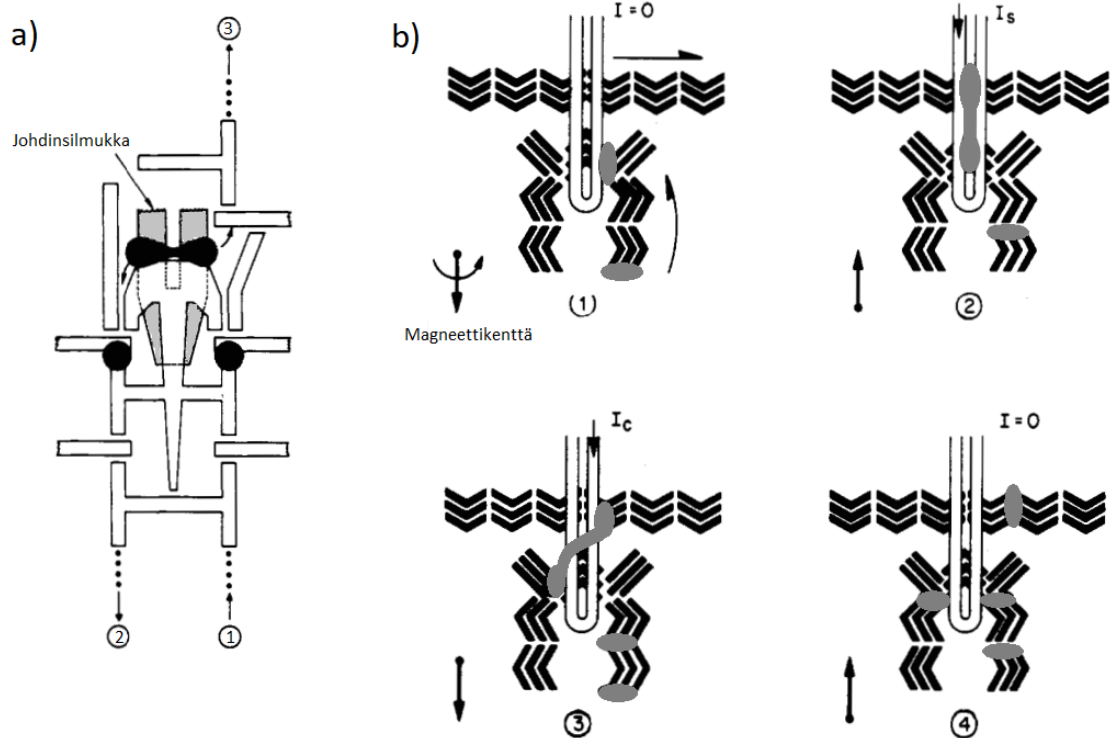
**Kuva 9.** Yksinkertaistettu kuva kuplan siirrosta magneettisilla T- ja I-palkeilla. Kuvassa ympyrä tarkoittaa kuplaa magneettisella kalvolla ja nuoli tarkoittaa kalvon pinnan suuntaista ulkoista magneettikenttää. Muokattu lähteestä [11].

Kuplamuistissa palkit järjestetään siten että radat, joilla kuplat kulkevat, ovat silmukan muotoisia. Silmukoista muodostetaan pääsilmutta ja sivusilmukat, kuten kuvassa 10. Pääsilmutta käytetään kuplien siirtoon kirjoitus- ja lukuelementeille. Pääsilmutta voi olla myös useampia, kuten esimerkiksi erikseen luku- ja kirjoitusoperaatioille. Sivusilmukat toimivat kuplien eli datan säiliöinä. Kuplat siirretään tai kopioidaan silmukkaradalta toiselle asettamalla johdinsilmukka ratojen risteyskohtaan ja johdinsilmukkaan syötetään sähkövirtapulssi. [12]



**Kuva 10.** Kuvassa esitettyä kuplamuistille yleinen pää- ja sivusilmukoiden ratkaisu. Muokattu lähteestä [14].

T-I-siirtopalkkeilla silmukoiden välinen kuplan siirto tai kopiointi on toteutettu siten, että risteyskohdassa on operaatiota varten muotoiltu siirtopalkki, joka venyttää sen kautta kulkevaa kuplaa. Palkin ja granaattikalvon väliin asetettuun johdinsilmukkaan syötettävä virtapulssi aiheuttaa silmukan keskelle, eli venyneen kuplan keskelle, magneettikentän. Syntynyt magneettikenttä halkaisee kuplan kahdeksi. Toinen kuplista jatkaa samalla radalla ja toinen kuplista jatkaa toiselle radalle, kuten kirjoitus- ja lukusilmukalle. Kuvassa 11a on kuvattuna menetelmän vaihe, jossa kupla on venyneenä ja osoitettuun johdinsilmukkaan syötetään virtapulssi. Ilman virtapulssia kupla jatkaisi normaalia reittiään, eli kuvassa 11a 1–2. Kopioitunut kupla jatkaisi reittiä 3. Kupla voidaan myös täysin siirtää radalta toiselle. Kun kupla on juuri siirtopalkin kohdalla, mutta ei vielä kuvan 11a mukaisesti venyneenä, syötetään johdinsilmukan läpi virtapulssi. Virtapulssin ansiosta kuplan rata estyy ja kupla jatkaa toiselle radalle. [12]

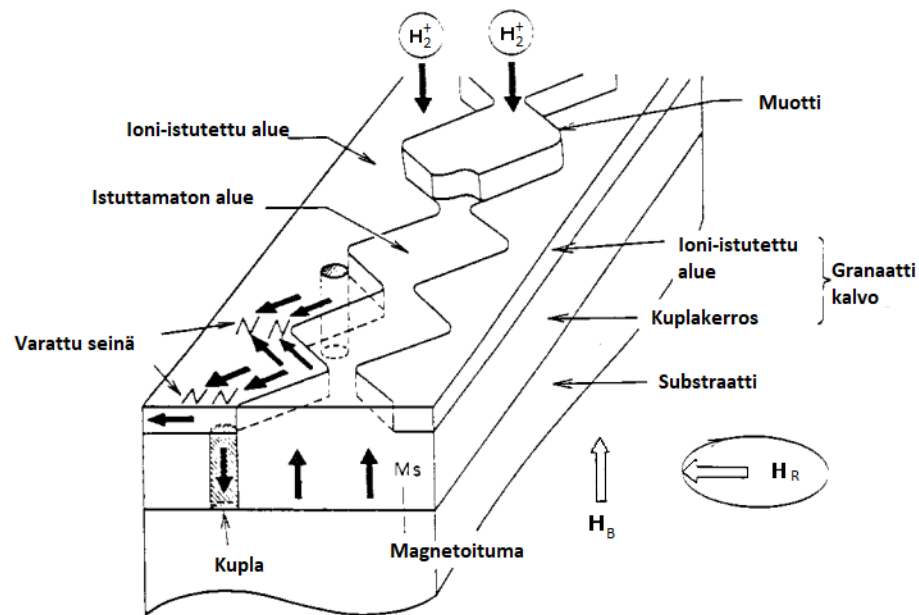


**Kuva 11.** Kuvattuna kuplien siirtomenetelmät T-I-palkkiyhdistelmällä (a) ja auran muotoisilla palkeilla (b). Muokattu lähteestä [12].

Aura-palkeilla käytetään myös johdinsilmukkaa granaattikalvon ja siirtopalkkien välissä ratojen risteyskohdassa (kuva 11b). Kuvan 11b kohdassa 2 voidaan nähdä, miten risteyksessä oleva kupla venytetään johdinsilmukkaan syötettävän virtapulssin  $I_s$  avulla. Kuplia siirretään sen verran, että venytetty kupla ulottuu molemmille radoille, kuten kohdassa 3. Johdinsilmukan läpi syötettävä vastakkaissuuntainen virtapulssi  $I_c$  aiheuttaa kuplan jakaantumisen ja kupla siten kopioituu toiselle radalle (kuva 11b, kohta 4). Kupla voidaan myös pelkästään tuhota jättämällä virtapulssi  $I_s$  pois operaatiosta ja synnyttää virtapulssi  $I_c$  kun kupla on oikealla kohdalla. Kuplan tuhoaminen siis vastaa databitin arvon '0' kirjoittamista. Tällä operaatiolla on kuitenkin vaikea toteuttaa kuplan täyttä siirtoa radalta toiselle, siten että kuplan kopio ei jää edelliselle radalleen. [12]

Myöhemmässä kuplamuistin kehitysvaiheessa 1980-luvulla siirtoon on käytetty myös ioni-istutettuja siirtoratoja (kuva 12). Ioni-istutusta tutkittiin jo kuplamuistin varhaisemmassakin vaiheessa, mutta ymmärrys ei riittänyt vielä sen soveltamiseen käytännössä [15]. Ioni-istutusta alettiin käyttää, koska permalloy-palkkien käyttäminen rajoitti tallennustiheyden kasvattamista. Huomattiin, että pienennettäessä kuplien kokoa, palkkien magneettisuuden luomiseen käytettävä magneettikenttä vaikuttaa negatiivisesti kuplien stabiiliuteen mahdollisesti tuhoten kuplan. Lisäksi pienempiä kuplia varten tarvitaan pienempiä siirtopalkkeja. Pienempien siirtopalkkien takia kupliin vaikuttava siirtovoima heikentyy ja tarvitaan suurempaa magneettikenttää palkeille, mikä jälleen heikentää kuplien

stabiiliutta. Ioni-istutuksessa siirtoradat luodaan istuttamalla esimerkiksi vetyioneja kranaattikalvon pintaan. Istutuksen ansiosta kalvon pinnan magneettisuudet kääntyvät pinnan suuntaisiksi. Oikean muotoisten siirtoratojen ja oikean suuntaisten magneettisuuksien aikaansaamiseksi käytetään tarkoitukseen valmistettua muottia. Muotti voi olla esimerkiksi kullasta valmistettua. Muotin alle jäävän kalvon magneettisuus pysyy ennallaan. Erisuuntaisten magneettisuuksien reunalle syntyy niin kutsuttuja varattuja seiniä, jotka vetävät kalvon kuplia puoleensa. Kääntämällä tason suuntaista ulkoista magneettikenttää kuplat siirtyvät radan mukaisesti. [16] [17]



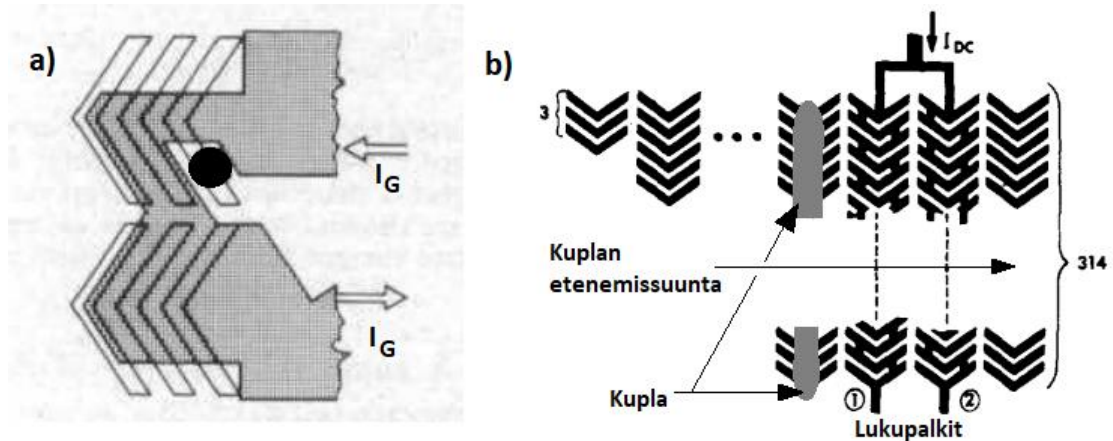
**Kuva 12.** Ioni-istutuksella muodostettu kuplien siirtorata kranaattikristallikalvolle. Muokattu lähteestä [16].

Myös ioni-istutuksen ja siirtopalkkien hybridimalleja kuplamuisteista on kehitetty. Siirtomenetelmien yhdistelmällä saavutetaan molempien tapojen hyödyt. Esimerkiksi muodostamalla sivusilmukat ioni-istutuksella saadaan kuplien tallennustiheyttä suurennettua ja muodostamalla pääsilmutka palkeilla saadaan käyttöön niiden kuplan kirjoitus- ja lukuratkaisut. [16] Esimerkiksi Umezaki et al. [17] esittelevät erään hybridikuplamuistin valmistusprosessin kyseisillä siirtomenetelmillä.

### 3.4 Datan kirjoitus ja luku

Datan kirjoitukseen eli kuplan muodostamiseen voidaan käyttää siihen tarkoitettua ydin-generaattoria. Eräs kuplaydin-generaattori käyttää niin kutsuttua hiuspinnijohdinsilmukkaa, jonka lävitse johdettu virtapulssi muodostaa silmukan keskelle paikallisen magneettikentän (kuva 13a). Syntynyt magneettikenttä kääntää sen kohdalla olevan granaattikalvon magneettisuuden toisin päin muodostaen kuplan. Kuvassa 13a on kuvattuna miten

harmaaseen johdinsilmukkaan syötettävä virtapulssi  $I_G$  muodostaa kuplan silmukan keskelle. Kupla voidaan virtapulssin jälkeen siirtää normaaliin tapaan eteenpäin. [12] Toinen tapa on käyttää kirjoituksessa niin kutsuttua siemenkuplaa. Siemenkupla kiertää omaa siirtopalkeista muodostettua rataansa ja se halkaistaan ja kopioidaan esimerkiksi pääsil- mukalle. Pääsil- mukalta kupla taas siirretään haluttuun sivusilmukkaan. Kopiointi voidaan tehdä edellisessä luvussa kuvatuilla operaatioilla. [15]



**Kuva 13.** Kuvattuna kuplaydingeneraattori (a) ja kuplan lukuelementti (b). Muokattu lähteestä [12].

Kuplan havaitsemiseen eli bitin lukuun käytetään kilparatamuistin tavoin magnetoressi- tiivistä ilmiötä. Aluksi lukuoperaatio toteutettiin asettamalla kuplien siirtoradan läheisyy- teen permalloy-materiaalista tehty ohut lukuelementti, jonka läpi syötetään tasavirtaa. Lukuelementin ohitse kulkeva kupla havaitaan tasavirtasignaalisissa hetkellisenä muutok- sena magnetoressiivisen ilmiön seurauksena. Parempi signaalin muutos on saavutettu, kun lukuoperaatio toteutetaan suoraan kuplien siirtoon käytettävillä aura-palkeilla (kuva 13b). Lukemiseen käytettävät aura-palkit yhdistetään pienillä kytkennöillä palkkien vä- lillä. Kytkennät mahdollistavat palkkien lävitse syötettävän tasavirran. Kuvassa 13b on kuvattuna lukemiseen käytettävät aura-elementit, joiden lävitse syötetään tasavirta  $I_{DC}$ . Elementin ylitse kulkeva kupla havaitaan virtasignaalin muutoksena. [12]

### 3.5 Kuplamuisti markkinoilla

Kuplamuistille tuli aikanaan melko nopeasti ensimmäiset kaupalliset tuotteet verratta- essa kilparatamuistiin. 1970-luvun puolessa välissä Hitachi-teknologiyhtiöltä tuli use- ammasta muistiyksiköstä koottu 32 kt versio ja Texas Instrumentilta 92 kbit yksikkö. 1980-luvun alussa Intel ja Hitachi tarjosivat 1 Mbit ja 4Mbit muistiyksikköjä, joista voitiin muodostaa toimiva muistikomponentti yhdistämällä yksi tai useampi muistiyksikkö ope- raatioita ohjaavan piirilevyn kanssa. [11] Esimerkiksi Hitachilta oli tarjolla vuonna 1986 1 Mt muistikomponentti, jossa oli kaksi 4 Mbit muistiyksikköä [16].

Kuplamuistiteknologian suosio alkoi laskea 1980-luvun alussa ja hävisi lähes täysin vuosikymmenen lopulla. Kuplamuistin häviämiseen vaikutti kilpailevien muistien suotuisampi kehitys. Yksi esimerkki kilpailevista muistiteknologioista on vielä tänäkin päivänä käytetty mekaaninen kiintolevy muisti. Kuplamuistilla oli verrattain suuri pakkaus, koska se vaati kestmagneetin kuplien ylläpitämiseen ja kalvon ympärille kelat muodostamaan magneettikentät siirtopalkeille. Lisäksi magneettisen kalvon muodostamiseen käytetyt materiaalit olivat suhteellisen kalliita. [11]



## 4. VERTAILU JA KUPLAMUISTIN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET

Vaikka muistitekniologioiden välillä on useampi vuosikymmen, voidaan niistä löytää edelleen samoja ominaisuuksia ja mahdollisesti myös kuplamuistista hyödynnettäviä sovelluksia kilparatamuistiin. Kuitenkin kilparatamuistin tutkimuksissa ja artikkeleissa on hyvin vähän viittauksia ja vertailua vanhempaan kuplamuistiin. Artikkeleissa on saatettu vain lyhyesti mainita olemassa olevasta edeltäjästä.

Selkeimmät erot löytyvät muistien mittasuhteissa. Markkinoille ehtineiden kuplamuistien kapasiteetit olivat aikanaan hyvinkin soveltuvia sen ajan tietokoneisiin. Ne eivät kuitenkaan mitenkään soveltuisi käyttöön tänä päivänä, kun halvimpien kuluttajakäyttöönkin myytävien tietokoneiden keskusmuistit ovat muutaman gigatavun luokkaa eli tuhat kertaa suurempia. Kilparatamuistin mahdolliset kapasiteetit taas toisivat suurenkin parannuksen. Esimerkiksi Verkkokauppa.com:n suurin tarjolla oleva kiintolevy on kooltaan 22 Tt, joka on yli kymmenen kertaa vähemmän kuin kilparatamuistille luvussa 2.6 mainittu mahdollinen 145 Tt kapasiteetti [18]. Jos kilparatamuistilla onnistutaan korvaamaan myös tietokoneen keskusmuistit, nousee prosessorin välittömässä läheisyydessä saatavilla oleva data yli satakertaiseksi. Lisäksi jos keskusmuisti ja massamuisti voidaan korvata kilparatamuistin avulla täysin, säästytään niiden välisen datan siirron viiveeltä.

Datan tallennuksessa muistit ovat pääpiirteiltään samanlaisia. Molemmat käyttävät magneettisten alueiden suuntia osoittamaan bitin arvoa ja ne varastoidaan magneettiselle materiaalille. Tosin kilparatamuistin alueet ovat alle 5 % kuplamuistin kuplan kokoon nähden. Yksityiskohtaisemmassa tarkastelussa pätevät samat magneettisuuden ilmiöt. Kuplamuistin kuplien seinät muodostuvat Bloch-tyyppisestä seinästä, kuten kilparatamuistillakin alueseinät tai skyrmionit. Skyrmionit ovat kuin kuplamuistin kuplia, mutta skyrmioneilla ei ole ongelmaa Bloch- ja Neel-rakenteiden sekoittumisen kanssa, mikä taas kuplilla on vaikuttanut stabiiliuteen ja liikkuvuuteen negatiivisesti. Skyrmioneilla tosin on tutkimuksissa havaittu epästabiiliutta huoneenlämmössä ja ilman lisättyä magneettikenttää [5]. Koska kuplamuistillakin havaittiin ongelmia kuplien stabiiliuden kanssa ulkoisen magneettikentän aiheuttamana, voisi mahdollisesti vanhoista kuplamuistin tutkimuksista löytyä apua skyrmionien stabiiliudelle.

Tutkimusten kannalta mielenkiintoinen muisteja yhdistävä tekijä on niiden tapa järjestää data-alueet sarjoihin ja niitä edestakaisin liikuttamalla kuljettaa haluttu data kirjoitus- ja lukuelementeille. Kilparatamuistilla yksi nanojohdin sisältää yhden bittisarjan, kun taas

kuplamuistilla yhdellä kalvolla on useampia bittisarjoista muodostettuja silmukoita. Yleisimmin kilparatamuistin nanojohtimet nähdään muodostettavan suorina tai U-muotoisina päättyvinä johtimina, toisin kuin kuplamuistilla kuplat järjestetään silmukoihin. Silmukoilla kuplia voidaan siirtää koko silmukan ympäri ilman että tapahtuu mahdollisia ylivuotoja, kuten kilparadan johtimilla [8]. Silmukaksi muodostettuja kilparatojakin on tutkittu ja huomattu, että niillä on myönteisiä vaikutuksia ylivuoto-ongelmaan ja datan saavutettavuuteen. Silmukan muotoisilla radoilla datasarjojen siirtelyä on saatu merkittävästi vähennettyä, mikä vaikuttaa myönteisesti virrankulutukseen ja datan saavutettavuusaikoihin. [19] [20] [21] Datan saavutettavuuteen vaikuttaa paljon myös se, miten data järjestetään muistin sisällä ja miten se saadaan luettavaksi. Kilparatamuistin datan järjestelylle onkin jo tehty tutkimuksia ja ehdotuksia, kuten esimerkiksi Khan et al. [22] ja Multanen et al. [23]. Myös kuplamuistin kehityksessä järjestely otettiin huomioon datan saavuttamisen parantamiseksi, kuten esimerkiksi jo vuonna 1972 Beausoleil et al. [13]. Katsaus kuplamuistin tutkimuksiin voisi olla aiheellista, koska kilparatamuistin tutkimuksissa ei näytä olevan huomioitu juurikaan mahdollisia kuplamuistin ratkaisuja datan järjestelyyn.

Data-alueiden siirto materiaalien sisällä taas eroaa muisteilla suurestikin. Kun kuplamuistin datan siirto perustui täysin ulkoisen magneettikentän kääntelyyn, kilparatamuistilla on osattu ottaa huomioon magneettikentän negatiiviset vaikutukset ja siirrytty käyttämään suoraan johtimeen syötettävää sähkövirtaa. Myös siirtonopeuksissa voidaan havaita olevan eroja, kun kilparatamuistien tutkimuksissa eri nanojohdinten materiaaleilla on päästy yli 1000 m/s data-alueiden nopeuksiin [5]. Kuplamuistiin verrattuna eri materiaaleilla on päästy parhaimmillaan satoihin metreihin sekunnissa, kun yleisimmin kuplien siirtonopeudet ovat alle 10 m/s [15]. Toteutusten eroavaisuuksista huolimatta molemmilla muisteilla datan siirron tarkoitus on sama eli siirtää data luku- ja kirjoituselementeille.

Myös muistien kirjoitus- ja lukuoperaatioiden menetelmät eroavat toisistaan. Kuten siirrossakin myös kilparatamuistin kirjoituksessa on tutkittu ulkoisen magneettikentän käyttöä, mutta todettu sen vaikuttavan negatiivisesti viereisiin nanojohtimiin. Kuplamuistin kirjoituksessa luodaan paikallinen magneettikenttä tai kopioidaan kupla virtasilmukan avulla, kun taas kilparatamuistissa suoraan nanojohtimen läpi syötetty virta kääntää alueen magneettisuuden. Lukuoperaatiossa käytetään samaa magnetoresistiivistä ilmiötä, mutta lukuelementtien rakenteet eroavat. Kilparatamuistissa lukemiseen käytetään kirjoitukseenkin käytettyä tunneliliitosta ja kuplamuistissa taas käytetään siirtoihin käytettyjä siirtopalkkeja.

Taulukkoon 1 on koottu muistien yleisimpiä ominaisuuksia. Siihen on myös eriteltynä muisteista löydettyjä yhteneviä ominaisuuksia. Selkeimpinä yhteneväisyyksinä on muistien perusominaisuudet, kuten bittien säilöminen ja siirto sarjoina. Myös mikrotason yhteneväisyyksiä on kuten magneettiset alueet ja niiden rakenteet sekä sähkövirran käyttö.

Taulukko 1. Muistien yleisimpiä ominaisuuksia sekä eriteltynä niistä löydettyjä yhteneväisyyksiä.

Ominaisuus	Kilparatamuisti	Kuplamuisti
Datan ilmentäminen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Magneettisina alueina</li> <li>- Poikkipinta-alan kattava alue (30-40 nm), Skymion "kupla" (&lt;5 nm)</li> <li>- Bloch ja Neel rakenteet</li> <li>- Magneettiselle metallijohdille sarjaan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Magneettisina alueina</li> <li>- Kuplat (500 nm)</li> <li>- Bloch-rakenne, Neel epästabiili</li> <li>- Magneettiselle granaattikalvolle silmukkamuodostelmiin ja sarjaan</li> </ul>
	<b>Yhteneväisyydet</b> Magneettiset alueet Bloch-rakenteet Bitit sarjoina	
Datan siirto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sähkövirralla nanojohtimeen</li> <li>- Suoraan magneettiseen osaan tai raskasmetalliosaan</li> <li>- Nopeudet parhaimmillaan yli 1000 m/s</li> <li>- Tarkoitus saada data luku- ja kirjoituselementeille</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Granaattikalvon pinnan suunnitella ulkoisella magneettikentällä</li> <li>- Siirtopalkit tai ioni-istutettu kerros</li> <li>- Nopeudet parhaimmillaan satoja metrejä sekunnissa, yleensä noin 10 m/s</li> <li>- Tarkoitus saada data luku- ja kirjoituselementeille</li> </ul>
	<b>Yhteneväisyydet</b> Tarkoitus saada data luku- ja kirjoituselementeille	
Muistiin kirjoitus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sähkövirta nanojohtimen poikki</li> <li>- Magneettinen tunneliliitos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sähkövirtapulssi johdinsilmukkaan</li> <li>- Ulkoinen magneettikenttä tai siemenkupla</li> </ul>
	<b>Yhteneväisyydet</b> Sähkövirran käyttö	
Muistista lukeminen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Magneto-resistanssi</li> <li>- Sähkövirta</li> <li>- Magneettinen tunneliliitos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Magneto-resistanssi</li> <li>- Sähkövirta</li> <li>- Toisiinsa liitetyt siirtopalkit</li> </ul>
	<b>Yhteneväisyydet</b> Magneto-resistanssi Sähkövirta	
Muistin kapasiteetti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mahdollisesti 145 Tt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 32 kt – 1 Mt</li> </ul>

## 5. YHTEENVETO

Työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus lupaavan kilparatamuistiteknologian sekä samankaltaisen vuosikymmeniä vanhan kuplamuistiteknologian ominaisuuksiin. Muistiteknologioiden samankaltaisuutta myös vertailtiin sekä samalla pohdittiin voisiko kuplamuistin vanhoista tutkimuksista ja ominaisuuksista löytyä ratkaisuja kilparatamuistin kaupallistamista hidastaviin ongelmiin.

Kilparatamuistin kirjallisuudesta voidaan huomata, että kilparatamuistille on tutkittu ja sovellettu monenlaisia ratkaisuja sen jälkeen, kun Stuart Parkin toi 2000-luvun alussa muistiteknologian muiden tietoisuuteen. Ominaisuuksille on löytynyt tutkimusten myötä parhaat toteutukset ja soveltumattomimmat on karsittu pois. Datan tallennukseen soveltuisi hyvin kolmiulotteiset nanojohtimet poikittaisella magneettisuudella ja data-alueiksi skrymionit pienen kokonsa takia. Alueiden siirtoon soveltuu sähkövirran syöttäminen nanojohtimeen ja käyttäen ferromagneettiseen johtimeen liitettyä raskasmetallijohdinta. Kirjoitus- ja lukuoperaatiot voidaan toteuttaa samalla magneettisella tunneliliitoksella.

Kuplamuistinkin teknologia lähti kehittymään yhden tutkijan eli Andrew Bobeckin ideoista ja päätyi markkinoille jo puolen vuosikymmenen jälkeen. Ominaisuuksille ehti tulla joitakin erilaisia ratkaisuja. Datan tallennuksessa käytettiin granaattikristallikalvoja, johon kohdistettiin kestopagneetilla ulkoinen magneettikenttä ylläpitämään kuplia. Yleisimmin kuplien siirtoon käytettiin magneettisia palkkiyhdistelmiä ja niillä muodostettiin kuplille pää- ja sivusilmukkaradat. Lukuoperaatioonkin soveltui siihen räätälöidyt siirtopalkit, joiden lävitse syötettiin sähkövirta. Kirjoitukseen taas soveltui siemenkupla, josta uusi kupla kopioitiin käyttäen silmukkaratojen väliseen siirtoonkin muodostettuja siirtopalkkeja ja virtajohdinsilmukkaa. Kirjoitus voitiin myös tehdä virtajohdinsilmukan avulla luomalla paikallinen magneettikenttä, joka muodosti kalvolle kuplan.

Muistiteknologioita vertailtaessa voidaan huomata niiden olevan hyvin samankaltaisia suuresta ikäerosta huolimatta. Ominaisuuksista samankaltaisia ovat esimerkiksi muistien pääpiirteet eli magneettisten alueiden käyttö datan ilmentämisessä ja datasarjojen edestakainen siirtely. Näistä huolimatta nykyisissä kilparatamuistin tutkimuksissa on otettu hyvin vähän huomioon kuplamuistin tutkimukset. Jatkotutkimuksissa voisikin olla aiheellista tutkia kuplamuistin tutkimuksia, jos sieltä löytyisi apuja esimerkiksi kilparatamuistin datan stabiiliudelle tai saavutettavuuteen.

# LÄHTEET

- [1] S. S. Parkin, "Shiftable Magnetic Register And Method Of Using The Same". Patentti US6834005B1, 2004.
- [2] S. S. Parkin, H. Masamitsu ja L. Thomas, "Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory," *Science*, nro 320, pp. 190 - 194, 2008.
- [3] G. Grosso ja G. Pastori Parravinci, *Solid State Physics*, Elsevier Science & Technology, 2014.
- [4] M. C. Gaidis ja L. Thomas, *Nanoscale Semiconductor Memories : Technology and Applications*, S. K. Kurinec ja K. Iniewski, Toim., CRC Press, 2017.
- [5] D. Kumar, T. Jin, R. Sbiaa, M. Kläui, S. Bedanta, S. Fukami, D. Ravelosona, S.-H. Yang, X. Liu ja S. Piramanayagam, "Domain wall memory: Physics, materials, and devices," *Physics Reports*, nro 958, pp. 1 - 35, 2022.
- [6] J. K. Galt, "Motion of a domain wall in FE3O4," *Physical Review*, nro 83, pp. 208-208, 1951.
- [7] W. Kang, C. Zheng, Y. Huang, X. Zhang, W. Lv, Y. Zhou ja W. Zhao, "Compact Modeling and Evaluation of Magnetic Skyrmion-Based Racetrack Memory," *IEEE transactions on electron devices*, osa/vuosik. 64, nro 3, pp. 1060 - 1068, 2017.
- [8] R. Blasing, A. A. Khan, P. C. Filippou, C. Garg, F. Hameed, J. Castrillon ja S. S. P. Parkin, "Magnetic Racetrack Memory: From Physics to the Cusp of Applications Within a Decade," *Proceedings of the IEEE*, nro 108, pp. 1303-1321, 2020.
- [9] O. Alejos, V. Raposo, L. Sanchez-Tejerina ja E. Martinez, "Efficient and controlled domain wall nucleation for magnetic shift registers," *Scientific Reports*, nro 7, pp. 11909-10, 2017.
- [10] M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner ja S. S. Parkin, "Current-Controlled Magnetic Domain-Wall Nanowire Shift Register," *Science (American Association for the Advancement of Science)*, osa/vuosik. 320, nro 5873, pp. 209 - 211, 2008.
- [11] F. J. Friedlaender ja J. A. W. J. G. Nyenhuis, "Magnetic Bubble Memory," *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 2001.
- [12] A. Bobeck, P. Bonyhard ja J. Geusic, "Magnetic bubbles-An emerging new memory technology," *Proceedings of the IEEE*, osa/vuosik. 63, nro 8, pp. 1176-1195, 1975.
- [13] W. F. Beausoleil, D. T. Brown ja B. E. Phelps, "Magnetic Bubble Memory Organization," *IBM journal of research and development*, osa/vuosik. 16, nro 6, pp. 587-591, 1972.
- [14] K. L. Doty, S. Y. W. Su ja J. D. Greenblatt, "Magnetic Bubble Memory Architectures for Supporting Associative Searching of Relational Databases," *IEEE transactions on computers*, Osa %1/%2C-29, nro 11, pp. 957 - 970, 1980.
- [15] M. Cohen ja H. Chang, "The frontiers of magnetic bubble technology," *Proceedings of the IEEE*, osa/vuosik. 63, nro 8, pp. 1196-1206, 1975.
- [16] R. Suzuki, "Recent Development in magnetic-Bubble Memory," *Proceedings of the IEEE*, osa/vuosik. 74, nro 11, pp. 1582 - 1590, 1986.
- [17] H. Umezaki, N. Koyama, R. Suzuki ja Y. Sugita, "Fabrication process for ion-implanted and Permalloy hybrid magnetic bubble memory," *IEEE transactions on magnetics*, osa/vuosik. 24, nro 5, pp. 2226 - 2234, 1988.
- [18] Verkkokauppa.com Oyj, [Online]. Available: <https://www.verkkokauppa.com/fi/product/842698/WD-Red-Pro-22-Tt-SATA-NAS-HDD-3-5-koval Levy>. [Haettu 27 4 2023].
- [19] G. Wang, Y. Zhang, B. Zhang, B. Wu, J. Nan, X. Zhang, Z. Zhang, J.-O. Klein, D. Ravelosona, Z. Wang, Y. Zhang ja W. Zhao, "Ultra-Dense Ring-Shaped Racetrack Memory Cache Design," *IEEE transactions on circuits and systems*, osa/vuosik. 66, nro 1, pp. 215 - 225, 2019.

- [20] J. H. Franken, H. J. M. Swagten ja B. Koopmans, "Shift registers based on magnetic domain wall ratchets with perpendicular anisotropy," *Nature nanotechnology*, osa/vuosik. 7, nro 8, pp. 499 - 503, 2012.
- [21] Y. Zhang, X. Zhang, J. Hu, J. Nan, Z. Zheng, Z. Zhang, Y. Zhang, N. Vernier, D. Ravelosona ja W. Zhao, "Ring-Shaped Racetrack Memory Based on Spin Orbit Torque Driven Chiral Domain Wall Motions," *Scientific reports*, osa/vuosik. 6, nro 1, pp. 35062 - 35062, 2016.
- [22] A. Khan, F. Hameed, R. Bläsing, S. Parkin ja J. Castrillon, "ShiftsReduce: Minimizing Shifts in Racetrack Memory 4.0," *ACM transactions on architecture and code optimization*, osa/vuosik. 16, nro 4, pp. 1 - 23, 2019.
- [23] J. Multanen, P. Jääskeläinen, A. A. Khan, F. Hameed ja J. Castrillon, "SHRIMP: Efficient Instruction Delivery with Domain Wall Memory," tekijä: *IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, 2019.