

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika (2476) õppekava

Karl Vilhelm Valter

Andmesalvestus polümeerses memristor fiibris

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendajad: Tarmo Tamm, PhD

Helle Hein, PhD

Tartu 2023

Andmesalvestus polümeerses memristor fiibris

Lühikokkuvõte:

Antud töös kirjeldatakse uut meetodit andmete salvestamiseks ning valideeritakse see eksperimentaalselt. Andmeid salvestatakse elektrit juhtiva polümeeri ahelate vahelistes keemilistes sidemetes kasutades ultraviolettkiirgust, mõjutades nii materjali juhtivust. Fiibrisse tekitatud juhtivusmustreid mõõtes on võimalik andmed taastada. Lisaks viiakse läbi analüüs, et uurida andmekandja potentsiaalseid omadusi nagu andmetihedus ning salvestus- ja lugemiskiirus. Leitakse, et omaduste teoreetilised väärtused on võrreldavad kõige uuema generatsiooni magnetlindi standardiga LTO-9. Paljulubavad esialgsed tulemused viitavad, et tegemist võib olla alternatiivse andmesalvestustehnoloogiaga, mis aitaks täita aina kasvavat globaalset salvestusmahudefitsiiti ning vajab edasist uurimist.

Võtmesõnad: Andmekandjad, elektrit juhtivad polümeerid,

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia; T390 Polümeeride tehnoloogia, biopolümeerid

Data storage in polymeric memristor fiber

Abstract:

In this thesis a new method for data storage is proposed and experimentally validated. Data is stored in chemical bonds between chains of an electrically conductive polymer using ultraviolet radiation. By measuring the conductive patterns in the fiber, the stored data can be restored. In addition, an analysis of the technology is conducted to study properties like data density and writing and reading speed of the fiber. The calculated theoretical values are comparable to the newest generation of magnetic tape standard LTO-9. The promising initial findings suggest potential to be an alternative data storage technology that could fill the growing data storage deficit and should be investigated further.

Keywords: Data storage, electrically conductive polymers, memristor, fiber

CERCS: T120 Systems engineering, computer technology; T390 Polymer technology, biopolymers

Sisukord

1.	Sissejuhatus	6
2.	Taustainfo.....	7
2.1	Andmete tootmine ja salvestamine.....	7
2.2	Ülevaade andmekandjatest ning tööpõhimõtetest	8
2.2.1	Magnetilised andmekandjad.....	9
2.2.2	Optilised andmekandjad.....	10
2.2.3	Laengulised andmekandjad	11
2.2.4	Takistuslikud andmekandjad.....	12
2.2.5	Ainukirjutusmälu.....	13
2.2.6	Mitmetasemelised mälurakud	13
2.3	Polümeermälu.....	13
2.3.1	DNA andmesalvestus	13
2.3.2	DNA sarnane andmesalvestus sünteetilistes polümeerides.....	14
2.3.3	Muud polümeermälud	14
2.4	Digitaalne signaalitöötlus andmete salvestamisel	15
2.5	Elektrit juhtivad polümeerid.....	15
2.5.1	Polüpürrool.....	16
2.5.2	Elektrijuhtivuse sõltuvus polüpürrooli molekulaarstruktuurist.....	17
2.5.3	Ultraviolettkiirguse mõju polüpürroolile	18
3.	Andmesalvestus polümeerses memristor fiibris.....	19

3.1	Andmete kodeerimine	19
3.2	Fiibrile kirjutamine	20
3.3	Fiibri lugemine	21
3.4	Andmete dekodeerimine	22
3.5	Fiibri kirjeldus	22
4.	Eksperiment	24
4.1	Polüpürrool paberi valmistamine	24
4.2	PPy paberi juhtivuse mõõtmine	25
4.3	Andmete kirjutamine polüpürrool paberile	26
4.4	Andmete lugemine polüpürrool paberilt	27
4.5	Eksperimendi kokkuvõte	28
5.	Analüüs	29
5.1	Fiibri omadused	29
5.1.1	Andmetihedus	29
5.1.2	Salvestus- ja lugemiskiirus	32
5.2	Teoreetilised fiibri omaduste piirväärtused	33
5.2.1	Teoreetiline maksimaalne andmetihedus	34
5.2.2	Teoreetiline salvestus- ja lugemiskiirus	36
5.3	Võrdlus olemasolevate andmekandjatega	37
6.	Kokkuvõte	39
7.	Viidatud kirjandus	40

Lisad	44
I. Analüüsiks kasutatava programmi kood	44
II. Litsents	47

1. Sissejuhatus

Inimkonna poolt toodetav andmehulk kasvab iga aastaga, kuid globaalne salvestusmaht ei kasva sama kiiresti. Ennustatakse aina suuremat salvestusmahu defitsiiti, mille peaks lahendama innovatsioon andmesalvestustehnoloogiates [1]. Lisaks teistele andmekandjatele uuritakse inimtekkeliste andmete salvestuseks ka DNA-d, sest andmed püsivad DNA-l tuhandeid aastaid ning see on nii andmetihe, et kõik inimkonna poolt toodetud andmed mahuksid ainult ühe inimese kehas olevale DNA-le [2]. See on võimalik, sest andmed on salvestatud molekulidesse ning nendevahelistesse sidemetesse, moodustades pikad molekulide ahelad ehk polümeerid. Siiski tuleneb sellest ka suurim takistus DNA kasutamisel andmekandjana. Nimelt DNA lugemine ning sünteesimine on kallis, väga aeglane ning vea-aldis [3].

Selle töö eesmärk on kirjeldada ja uurida autori poolt väljapakutud mehhanismi ning tehnoloogiat andmete salvestamiseks polümeerses memristor fiibris. Selles andmekandjas on sarnaselt DNA-le andmed salvestatud polümeerse aine keemilistesse sidemetesse, kuid pakutakse kasutada andmete salvestamis- ja lugemisprotsesse, mida on võimalik efektiivselt suurel skaalal rakendada. Töö autor ei leidnud ühtegi publitseeritud allikat, milles oleks sellist andmesalvestusmeetodit varem kirjeldatud ning sellest tulenevalt seatakse töö peamiseks uurimisküsimuseks, kas on võimalik polümeerses memristor fiibris andmeid salvestada ja lugeda. Tehnoloogia realiseeritavaks osutumisel uurida andmekandja võimalikke omadusi ning võrrelda seda teiste olemasolevate andmekandjatega.

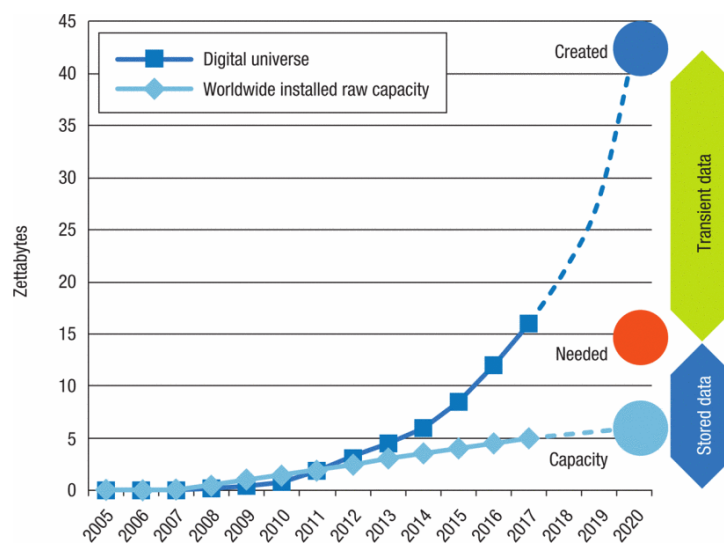
Töö põhiosa on jaotatud neljaks peatükiks. Esimene annab ülevaate erinevatest teemadest, mis annavad vajaliku taustainfo, et mõista ja seletada autori väljapakutavat andmesalvestustehnoloogiat. Töö teises osas kirjeldatakse selle tehnoloogia olemust. Kolmandas osas viiakse tehnoloogia valideerimiseks läbi eksperiment, kus valmistatakse kirjeldatud andmekandja ning kirjutatakse ja loetakse sellelt andmeid. Töö viimases osas analüüsitakse, millest sõltuvad uuritava andmekandja omadused ning võrreldakse seda kasutusel olevate andmekandjatega. Tööle on lisatud ka analüüsiks tarvilike arvutuste ja graafikute tegemiseks kirjutatud programmi kood.

2. Taustainfo

Selle peatüki eesmärk on anda ülevaade arendatava uue andmekandja vajalikkusest, tutvustades andmete tootmist ja salvestamist maailmas, ning kirjeldatakse lühidalt hetkel kasutusel olevaid või uuritavaid mälutüüpe ning nende tööpõhimõtteid, et rõhutada töö käigus arendatava lahenduse originaalsust. Käsitletakse ka digitaalse signaalitöötluse põhilisi meetodeid, mida on vaja digitaalsete andmete salvestamisel ja lugemisel. Lisaks tutvustakse elektrit juhtivaid polümeere ning bakalaureusetöö eksperimentaalses osas kasutatavat polümeeri polüpurrooli ja mehhanismi, millega on võimalik muuta selle juhtivust.

2.1 Andmete tootmine ja salvestamine

Kogu inimkonna poolt toodetav andme hulk hinnatakse 2020. aastal olevat 44 ZB (zetabait) ning 2025. aastaks ennustatakse, et hulk kasvab 163 kuni 175 ZB-ni. Salvestusmaht ei kasva piisavalt kiiresti, nagu on näha ka joonisel 1. Kogu toodetud andmetest on vaja säilitada väike osa, umbes 10-20% [1, 4].



Joonis 1. Toodetud ja salvestatud andmed aastast 2005 kuni 2020 [1].

Salvestust vajavaid andmeid toodetakse teise hinnangu põhjal 2025. aastal 7,5 ZB, millest umbes pool on ettevõtete poolt omatud ning saab liigitada selle järgi, kui tihti on tarvis andmeid kasutada. Organisatsioonide andmetest:

- 10% on „kuumad“ ehk neid on vaja tihedamini kui 10 päeva tagant,
- 30% on „soojad“ ehk neid on vaja tihedamini kui 30 päeva tagant,

- 60% on „külmad“ ehk neid on vaja harvemini kui 30 päeva tagant.

Seega umbes 2 ZB salvestusmahtu, mis tuleb lisada 2025. aastal, on külmalletus. Külmalletusele esitatakse teised nõuded kui kuumalletusele. Külmalletuse puhul läheb andmeid piisavalt harva vaja, järelikult ei ole külmade andmete puhul oluline lühike pöördumisaeg ehk keskmine aeg, mis kulub alates käsust andmete lugemiseni. Hoopis olulisemaks muutuvad seadme odav hind, madalad ülevalpidamiskulud, energiasäästlikkus, töökindlus ja turvalisus, sest andmeid on vaja põhimõtteliselt hoiustada igavesti [5, 6].

Kuumade andmete hoiustamiseks kasutatakse tavaliselt pooljuhtkettaid (SSD), sest nendel on kõige lühem pöördumisaeg. Soojade andmete hoiustamiseks kasutatakse üldiselt kõvaketta (HDD) ja SSD kombinatsiooni, sest kõvakettad on sama mahu kohta palju odavamad. Hetkel kasutakse ka külmade andmete salvestamiseks kõvakettaid, sest need ühilduvad ülejäänud süsteemiga lihtsasti ning on võrdlemisi odavad, kuid külmade andmete hoiustamiseks on odavam ning turvalisem kasutada magnetlinte [5].

Kõikide andmekandjate tootmine suureneb iga aastaga. Erandiks on optilised mäluseadmed, sest inimesed ei osta enam CD- ega DVD-kettaid, vaid kasutavad multimeedia tarbimiseks voogedastust. Suurema osa toodetavast salvestusmahust moodustavad kõvakettad, teisel kohal on SSD ning kolmandal magnetlindid [4].

Eksisteerib suur salvestusmahu puudujääk, sest kõvaketaste tootmise suurendamine ehk tehaste juurde ehitamine on väga kallis. Sellepärast ennustatakse, et just innovatsioon andmesalvestustehnoloogiate vallas täidab selle puudujäägi maailma salvestusmahus [1].

2.2 Ülevaade andmekandjatest ning tööpõhimõtetest

Andmekandjad jaotatakse klassidesse selle järgi, kas seade vajab pidevalt energiat, et andmeid säilitada. Energiat vajavad andmekandjad on volatiilsed, tuntud ka kui hävimälud. Andmekandjad, millelt andmed energiapuuduse tõttu ei kao, on mitte-volatiilsed, mittehaihtuvad ehk säilmälud [6]. Käesolevas töös keskendutakse ainult säilmäludele, sest töö käigus arendatav andmekandja kuulub vastavasse klassi.

Andmekandjaid saab grupeerida ka tööpõhimõtete järgi ehk selle järgi, millist füüsilist nähtust kasutatakse, et representeerida andmepunkti mäluseadmes. Kõige rohkem kasutatud andmekandjagrupid tööpõhimõtte järgi on:

- magnetilised andmekandjad
- optilised andmekandjad
- laengulised andmekandjad
- takistuslikud andmekandjad

Tähelepanu tuleb pöörata ka järgnevale: kas andmekandjale on võimalik või lubatud kirjutada korduvalt või ainult ühe korra, mille järel on võimalik andmeid vaid lugeda. Oluline on ka, mitut bitti korraga andmekandja mälurakus salvestatakse. Enamasti on võimalik salvestada ainult ühte bitti, kuid mitmetasemelistes mälurakkudes saab korraga salvestada ka rohkem bitte.

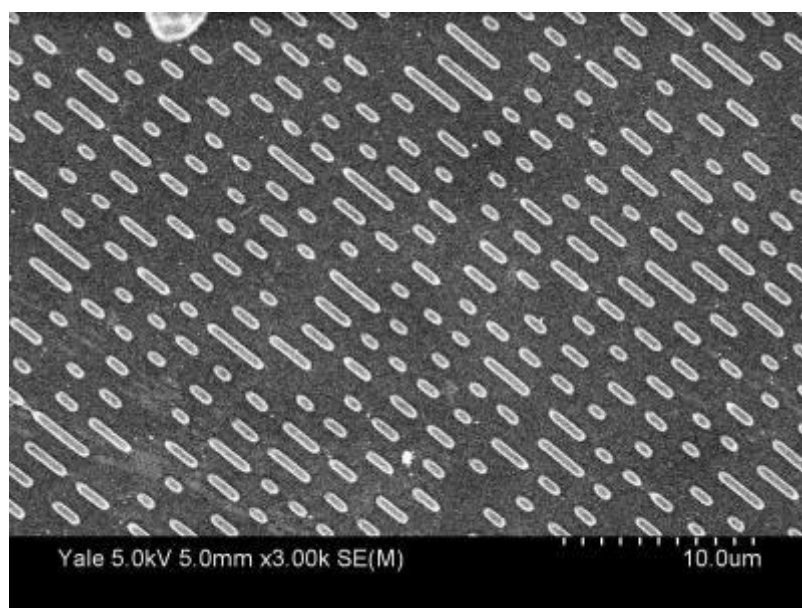
Kõikide andmekandjate puhul on olulised parameetrid andmetihedus ning salvestus- ja kirjutamiskiirus. Andmetihedus mõõdab, kui suurt andmehulka hoiustatakse mingis ruumiühikus. Sõltuvalt andmekandjast ja kontekstist eristatakse pindalalist, ruumilist ja lineaarset andmetihedust. Salvestus- ja kirjutamiskiirus näitab, kui suurt andmehulka salvestatakse või loetakse sekundis.

2.2.1 Magnetilised andmekandjad

Magnetilised andmekandjad salvestavad andmeid, kasutades materjalide magnetilisi omadusi. Kõige olulisemad magnetilised andmekandjad on kõvakettad ja magnetlindid, sest nendes on salvestatud suurem osa maailma andmetest. Mõlemas andmekandjas salvestatakse andmeid, muutes ferromagnetilises kihis asuvate magnetiliste domeenide magnetmomente, luues nii kihis magnetilisi mustreid. Magnetlindis on ferromagnetilised osakesed kleebitud polüetüleen-naftalaadist lindile, kuid kõvaketaste puhul on mitte-ferromagnetiline ketas (nt alumiinium või klaas) kaetud 10-20 nm paksuse magnetilise kilega. Kirjutamisel tekitab kirjutuspea elektromagneti abil magnetvälja, mis polariseerib salvestuspiirkonnas olevad magnetdomeenid. Üks polarisatsiooni suund loetakse üheks ning vastassuund nulliks. Lugesdes liigub lugemispea üle salvestuspiirkonna ning selles tekib induksioonivool tänu magnetilise kile muutuvale magnetväljale. Kõvaketaste andmetihedus on piiratud nende magnetdomeenide suurstega ning tavaliselt kasutatakse ühe biti salvestamiseks rohkem kui ainult ühte domeeni. Kui domeenide mõõtmed on väga väikesed, siis on nende magnetväljad liiga nõrgad ning domeenid muutuvad ebastabiilseteks. Magnetmoment võib muutuda läbi juhuslike termiliste protsesside ning andmed mälurakust kaduda [7–9].

2.2.2 Optilised andmekandjad

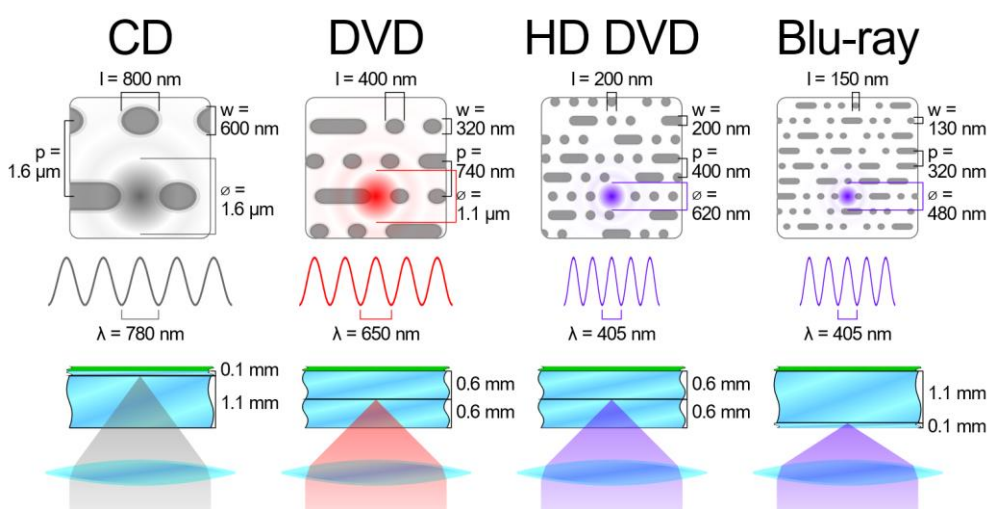
Optilised andmekandjad salvestavad andmeid, kasutades materjalide optilisi omadusi. Kõige tuntumad näited nendest on CD-d (*Compact Disc*), DVD-d (*Digital Versatile Disc*) ja Blu-ray-kettad. Põhimõtteliselt kõik tehnoloogiad rakendavad lasereid info kirjutamiseks ja lugemiseks. Laialt kasutuses olev lugemismälu ehk ROM (*Read Only Memory*) optilised lahendused kasutavad enamasti täpselt samasugust lahendust. Plaat koosneb polükarbonaadist kettast, millele on tekitatud spiraalne rada, kus asuvad augud sügavusega 125 nm. See ebatasane pind kaetakse õhukese alumiiniumkihiga ning õrna metalli kaitseks lisatakse polüakrüülist kiht, millele saab vajadusel lisada sildid vms. Andmed on salvestatud antud pinna topograafiasse, sest kui nurga all oleva laseriga mööda andmevagu liikuda ning mõõta alumiiniumilt tagasi peegelduva valguse intensiivsust, siis august valgust nii palju tagasi ei peegeldu. Peegelduva valguse intensiivsuse muutus tähendab, et salvestatud andmetes muutus null üheks või vastupidi. CD-plaadi andmevagusid on näha skaneerivas elektronmikroskoobis joonisel 2 [10].



Joonis 2. CD-plaadi andmevaod skaneerivas elektronmikroskoobis [10].

Lisaks ROM-tüüpi lahendustele toodetakse kettaid, millele saavad kasutajad ise andmeid kirjutada. Laialt kasutatav näide on CD-RW (*Compact Disc-Rewritable*). Kirjutatavatel plaatidel ei ole andmed salvestatud peegeldava pinna topograafias, vaid peegeldava pinna kohal asuvas kihis. Selle kihi optilist läbipaistvust muudetakse kirjutamisel laseriga. Ainukirjutatavate plaatide puhul on kihis värvaine, mille läbipaistvus muutub laservalgusega kokku puutudes. Kettad, millele on võimalik korduvalt kirjutada, kasutavad

kihise materjali, mille läbipaistvus sõltub materjali faasist. Kristalliline faas on läbipaistvam kui amorfne faas ning faasisiirde saab läbi viia, kuumutades kihti laseriga. CD, DVD ning Blu-ray tehnoloogiad kasutavad kõik sama suurusega plaate, kuid vastavalt järjekorrale on andmevaod kitsamad ja paiknevad tihedamalt. Vagude mõõtmiseks peab olema lühem kasutatava laseri lainepikkus, nagu näha joonisel 3. Tihedamate ja peenemate vagudega saavutatakse aina suuremaid andmetihedusi. Andmetihedust saab veelgi suurendada, kui kasutada kahedimensionaalse struktuuri asemel hoopis kolmedimensionaalset. 3D-salvestussüsteemid on siiski jäänud hetkel laborisse, kuid potentsiaalselt pakuvad erakordselt suurt andmetihedust [10, 11].



Joonis 3. CD, DVD, HD DVD ning Blu-ray tehnoloogiate võrdlus [12].

2.2.3 Laengulised andmekandjad

Laengulised andmekandjad kasutavad info salvestuseks elektrilist laengut. Säilmälu tüüpi andmekandjatest on kõige kasutatum tehnoloogia välmälu ehk tehnoloogia, mis teeb võimalikuks mälu pulgad, mälu kaardid ning pooljuhtkettad (SSD). Bitt salvestatakse laenguna ujupais elektroodile, mis kontrollib transistorit ehk elektrilist lüliti. Ujupaisu on võimalik elektronidega laadida, omistades sellele negatiivse laengu, ning selle laengu olemasolu või puudumine määrab, kas salvestatud on üks või null. Laeng jääb ujupaisule püsima aastateks, kuid kvantfüüsikalise tunneliefekti tõttu laeng vaikselt hajub. Andmetihedust piirab asjaolu, et mälu raku mõõtmeid ei saa liigselt alandada, sest mida väiksemad on mõõtmed, seda lihtsamalt elektronid tunnelleeruvad. Sellest tulenevalt kaob laeng elektroodilt kiiremini ning sellel pole võimalik enam ohutult andmeid hoiustada [6, 13].

2.2.4 Takistuslikud andmekandjad

Takistuslikud andmekandjad kasutavad andmete salvestamiseks takistuse ehk juhtivuse muutust materjalis. Ühtegi sellist andmekandjat pole laialt kasutuses, kuid neid on väga palju uuritud ning kõige arenenum on takistuslik suvapöördusmälu ehk ReRAM või RRAM (*Resistive random-access memory*). Mälurakku nimetatakse takistusliku tehnoloogia puhul memristoriks ehk mälutakistik. ReRAMi mälurakk valmistatakse dielektrilisest materjalist ehk muidu halvasti elektrit juhtivast materjalist, kuid piisavalt suure pinge rakendamisel tekivad juhtivuskoridorid, mis muudavad juhtivuse paremaks. Vastupidise pinge rakendamisel juhtivuskoridor kaob ning takistus tõuseb. Sedasi on võimalik salvestada ja kustutada andmeid takistusena memristoris. Mehhanism, mis muudab juhtivust, ei pea olema pinge, vaid oluline on memristori takistuse muutus interaktsiooni käigus [14–17]. Mälutüübid ning nende tööpõhimõtted on toodud veel kord esile tabelis 1.

Tabel 1. Mälutüübid ning nende omadused.

Mälutüüp	Näited	Tööpõhimõte
Magnetiline	Kõvakettad Magnetlindid	Bitt salvestatakse mälurakus magnetiliste domeenide polarisatsiooni suunas.
Optiline	CD-, DVD-, Blu-ray-kettad	Bitt salvestatakse mälurakus peegeldava pinna topograafias või peegeldava pinna pealse kihi läbipaistvuses.
Laenguline	Välkmälu, SSD, SD-kaardid, mälupulgad	Bitt salvestatakse mälurakus ujupaisul olevas laengus.
Takistuslik	ReRAM	Bitt salvestatakse mäluraku ehk memristori juhtivuses.

2.2.5 Ainukirjutusmälu

Ainukirjutusmälu on tuntud ka kui WORM (*Write-Once, Read-Many*) ning selle mälutüübi puhul saab andmeid kirjutada ainult ühe korra, peale kirjutamist andmeid muuta ega kustutada ei saa. Tegemist võib olla andmekandja tehnoloogilise piiranguga või tahtlikult seatud takistusega ning selle eesmärk on kaitsta andmeid pahatahtliku ja ka juhusliku muutmise või kustutamise eest. Kõige tuntumad näited ainukirjutusmäludest on CD-d, DVD-d ning Blu-ray-kettad, kuid magnetlindi standard LTO (*Linear Tape Open*) pakub ka WORM varianti ning tarkvaraliselt on võimalik sätestada kirjutuskeeldu igale andmekandjale [15, 16, 18, 19].

2.2.6 Mitmetasemelised mälurakud

Eelnevalt kirjeldatud mälurakkudes salvestati korraga ainult üks bitt, kuid ühes mälurakus on võimalik hoiustada ka suuremat andmekogust. See eeldab, et mälurakul on rohkem kui kaks erinevat olekut, millesse on võimalik seda viia ning seda olekut hiljem tuvastada. Selliseid mälurakke nimetatakse mitmetasemelisteks. Mitmetasemeliste mälurakkudega andmekandjad on palju andmetihedamad kui ühetasemelistega. Peamiselt kasutatakse mitmetasemelisi mälurakke pooljuhtketastes, mis on seetõttu suurema andmetihedusega, kuid lühema elueaga [6, 20].

2.3 Polümeermälu

Polümeermälu on lai ning mitte eriti täpselt defineeritud nimetus mälusalvestustehnoloogiatele, mis kasutavad mälusalvestuse protsessis polümeere. Kuigi näiteks magnetlint koosneb peamiselt polümeerist, ei ole see näide polümeermälust, sest salvestusmehhanism on realiseeritud ferromagnetilistes osakestes. Polümeermälus peaks mälurakus olev andmepunkt olema realiseeritud just polümeeri mingi omaduse näol [16].

2.3.1 DNA andmesalvestus

Kõige markantsem näide polümeermälust on DNA, sest seda andmekandjat kasutab kogu elusloodus, et salvestada, paljundada ja jagada geneetilist informatsiooni. DNA-d soovitakse kasutada ka inimtekkeliste andmete salvestamiseks, sest DNA on väga andmetihe ning pika elueaga. DNA andmetihedus on 1 EB/mm^3 (eksabaiti ruutmillimeetri kohta) või 215 PB/g (petabaiti grammi kohta), olles suurem kõikidest andmekandjatest.

Lausa kõik andmed, mis inimkond on tootnud, mahuksid ühe inimese kehas leiduvale DNA-le. Vaatamata sellele säilivad andmed DNA-s väga kaua, kineetiliselt kiirendatud vanandamistestid hindavad, et andmed on loetavad vähemalt peale 2000 aastat [2].

DNA on polümeer, mille peaahel koosneb fosforhappejääkidest ja desoksüriboosist ning selle külge kinnituvad neli erinevat lämmastikalust: adeniin (A), guaniin (G), tsütosiin (C) ja tümiin (T). Binaarsete andmete kirjutamiseks tuleb lihtsalt vastavusse viia kahendkood ja lämmastikalused, näiteks A on „00“, G on „01“, C on „10“ ja T on „11“. Nõnda on võimalik salvestada ükskõik milliseid andmeid DNA-l [3].

DNA inimtekkeliste andmete salvestamiseks kasutusele võtmist takistab peamiselt kõrge kulu ning protsessi ebaefektiivsus. Andmete kirjutamise protsess on ülimalt aeglane, umbes 400 baiti sekundis, mis on miljoneid kordi aeglasem kui kirjutamine kasutusel olevatele andmekandjatele. Lisaks on DNA sünteesimine hetkel väga kallis ning andmete lugemiseks on esmalt vaja huvipakkuvast DNA ahelast teha palju koopiaid, mille järel on võimalik need sekveneerida. Antud protsess on destruktiivne ehk tuleb säilitada ka mõned algsed koopiaid [2].

2.3.2 DNA sarnane andmesalvestus sünteetilistes polümeerides

DNA-d imiteerivaid ehk erinevatest monomeeridest koosnevaid aperioodilisi kopolümeere on võimalik ka tehislikult sünteesida. Nii on võimalik saavutada isegi suuremaid andmetihedusi, kuid kirjutamine ja lugemine on veelgi ebaefektiivsemad ja aeglasemad ning see tehnoloogia pole ligilähedaseltki valmis suurte andmemahtude hoiustamiseks [21, 22].

2.3.3 Muud polümeermälud

Kuniks üksikute molekulide ning keemiliste sidemete kasutamine andmesalvestuses pole realiseeritav, kasutatakse polümeeride muid omadusi. On võimalik luua laengulisi andmekandjaid, kasutades juhtivaid ja mittejuhtivaid polümeere, ning transistoreid, kasutades pooljuhtivaid polümeere [16].

Lisaks on võimalik luua takistuslikke andmekandjaid, mis võivad olla korduvkirjutatavad, sest polümeerides esineb ka juhtivuslülitus nähtus, kuid saab realiseerida ka ainukirjutusmälu. Juhtivuse muutmiseks kasutatakse erinevaid mehhanisme, millest kõige

populaarsem on elektrilise pinge rakendamine, kuid kasutakse ka nähtavat valgust, mis läbi fotojuhtivuse efekti langetab memristori takistust [15, 16, 18, 23].

2.4 Digitaalne signaalitöötlus andmete salvestamisel

Digitaalandmed on diskreetsed ning koosnevad numbritest, mis binaarsüsteemis tähendab, et andmed koosnevad ühtedest ja nullidest. Analoogekujul on andmed pidevad ehk andmed ei ole jaotatud järjestikusteks üksikuteks andmepunktideks ega oma ka diskreetseid väärtuseid [24].

Digitaalsete andmete salvestamine füüsilistes objektides eeldab, et andmepunkti hakkab representeerima mingi füüsiline omadus, mida on võimalik muuta, säilitab antud omaduse ning on hiljem võimalik mõõta. Praktiliselt on kõik need omadused pidevad, mitte diskreetsed, seega tuleb salvestamiseks digitaalandmed muundada analoogekujule, milleks kasutatakse digitaalanalooemuundurit. Andmete lugemisel on protsess pööratud ehk analoogekujul olevad andmed on vaja muundada tagasi digitaalkujule analoogdigitaalumuunduriga [24].

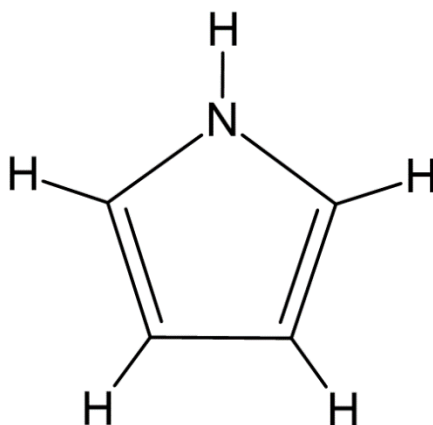
Andmete muundamise protsessis on olulised sammud diskreetimine ja kvantimine. Diskreetimise eesmärk on fikseerida väärtus mingil kindlal ajahetkel. Ruumilisel diskreetimisel fikseeritakse mõõtmistulemus mingis ruumipunktis. Diskreetimissagedus näitab, kui tihti seda korratakse ja diskreetimissuurus seda, kui palju bittide kasutatakse, et väärtust kirjeldada. Kvantimine on mõõdetud tulemuse ümardamine diskreetseks sobivaks väärtuseks ning kvantimisügevus on kvantimisastmete maksimaalne arv ehk kui palju erinevaid diskreetseid väärtusi ühes andmepunktis olla saab [25].

2.5 Elektrit juhtivad polümeerid

Ajalooliselt on orgaanilised polümeerid kasutusel olnud isolaatoritena, kuid juhtivate polümeeride avastamise järel tekkis uus eraldiseisev populaarne teadusharu. Elektrit juhtivate polümeeride juhtivus on võrreldav metallide juhtivusega ning leidub ka pooljuht polümeere. Kõigel laiemalt kasutuses olevad juhtivad polümeerid on näiteks polüpürrool, trans-polüatsetüleen ning polütiofeen. Need materjalid võivad eksisteerida väga erineval kujul, õhukeste kiledena, fiibritena, pulbritena või nanostruktuuridena ning nende eelis metallide ees on kerge kaal, paindumus ning lai valik tootmismeetodeid [26–28].

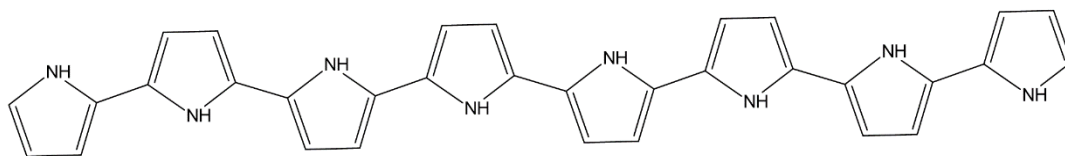
2.5.1 Polüpürrool

Polüpürrool (PPy) on elektrit juhtiv polümeer, mida kasutati antud töö eksperimentaalses osas juhtiva komponendina. PPy monomeer on pürrool, mis koosneb neljast süsiniku aatomist, ühest lämmastiku aatomist ning kuuest vesiniku aatomist, eksisteerib kaks kaksiksidet süsinike vahel [26]. Pürrooli molekuli on näha joonisel 4.



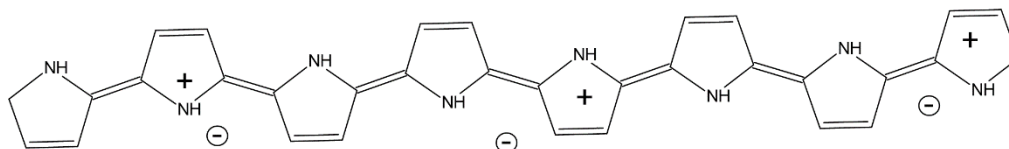
Joonis 4. Pürrooli struktuurvalem.

Pürrool on kergesti lenduv spetsiifilise lõhnaga läbipaistev vedelik, kuid polümeeri kujul on PPy tumedat värvi ning vees mittelahustuv tahke aine. Monomeeridest polümeeri valmistamist nimetakse polümeristatsiooniks ning pürrooli polümeriseerimiseks on vaja monomeeri oksüdeerida. Protsessi käigus liituvad monomeerid ahelaks, valmis polümeeris võib ahela pikkus olla sadu või tuhandeid korduvühikuid pikk. Polümeer, mida ei ole dopeeritud, ei ole juhtiv, see on nähtav ka jooniselt 5, sest kaksiksidemed paiknevad igaüks oma tsükli sees [26].



Joonis 5. Dopeerimata polüpürrooli ahel.

P-dopeerimine eemaldab ahelalt elektrone ning ahelale tekivad positiivsed laengud, mille tõttu paigutuvad ümber kaksiksidemed. Selleks, et säilitada terve polümeeri neutraalne laeng, peavad ahelate läheduses paiknema negatiivse laenguga osakesed (tavaliselt soola anioonid), tänu nendele on summaarne laeng siiski null [26]. Järelikult nüüd paiknevad kaksiksidemed ning laengud nagu joonisel 6.

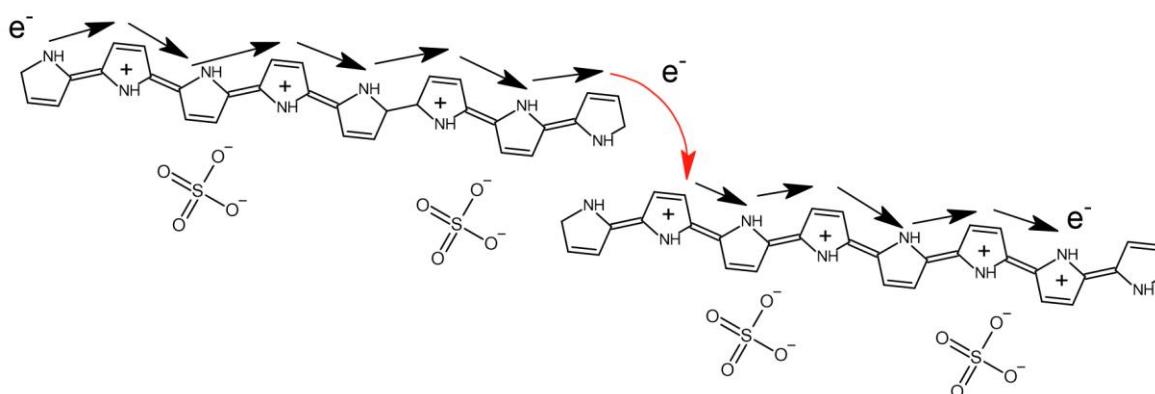


Joonis 6. Dopeeritud polüpürrooli ahel.

Tänu kaksiksidemete konjugatsioonile, mis ulatub üle kogu konjugeeritud ahela, muutub võimalikuks elektronide liikumine välise elektrivälja mõjul mööda konjugatsiooni ehk ahel muutub elektrit juhtivaks [26].

2.5.2 Elektrijuhtivuse sõltuvus polüpürrooli molekulaarstruktuurist

Sünteesitud ja parajalt dopeeritud ehk pikkade hargnemata ahelatega PPy juhib elektrit hästi, sest elektronid saavad liikuda kergelt mööda konjugeeritud ahelat ning suurim takistus elektronidele on ahela lõppemine, sest siis peab laeng liikuma ühelt ahelalt teisele. Ahelate vahel liikumisel on oluline ka ahelate teineteise suhtes paiknemine. Joonisel 7 on nooltega näidatud elektroni liikumine ning punane nool näitab elektroni hüpet juhtivuskoridoride vahel. Joonisel on lisatud ka negatiivse laengu kandjatena sulfaadi ioonid.

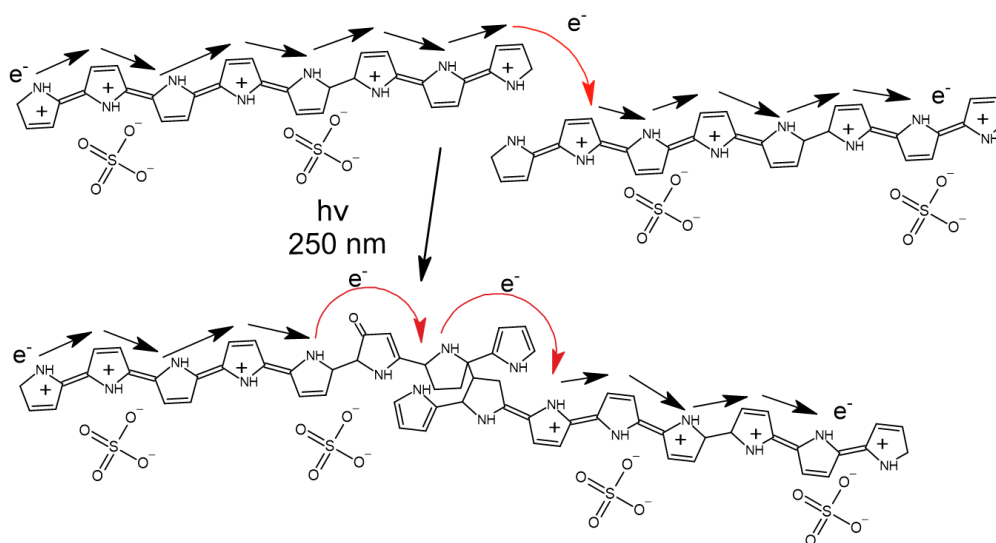


Joonis 7. Elektroni liikumine kahel polüpürrool ahelal.

Igasugune defekt, mis lõhub konjugatsiooni, halvendab polümeeri juhtivust, sest loob elektronide tee takistusi. Näiteks kahe ahela vahele tekkiv ristide või ahelaga liituv aatom hõlmab ahelas olevate süsinike elektrone ning seetõttu varasemad kaksiksidemed purunevad. Seega kaob ka konjugatsioon ning n-ö kerge vastupanukoridor, mida mööda juhtivuselektronid liikuda said. Siit võib järeldada, et struktuursed defektid muudavad PPy juhtivust [26].

2.5.3 Ultraviolettkiirguse mõju polüpürroolile

Ultraviolettkiirgus (UV-kiirgus) on elektromagnetkiirgus, mille lainepikkus jääb vahemikku 10-400 nanomeetrit. Töö eksperimentaalses osas on kasutuses 250 nm lainepikkusega UV allikas. Lainepikkusega 250 nm valguse kvandienergia on 5 elektronvolti (eV) ning C-C sideme lõhkumiseks kuluv täpne energia sõltub molekulist ning ümbrusest, kuid üldiselt on vahemikus 3,6-3,9 eV [29]. Kuna 250 nm footoni kvandienergia on piisav, et viia läbi fotolüüsi, siis saavad PPy kiirgamisel aset leida struktuursed muutused, mis lõhuvad ahelatel konjugatsiooni, nagu näha joonisel 8.



Joonis 8. Elektronide liikumine polüpürrooli ahelatel enne ja peale kiirgamist.

Defektid katkestavad konjugatsiooni ning tekitavad piirkondi, kus laengukandja liikumine on raskem, seega on võimalik 250 nm lainepikkusega kiirgamisega muuta lokaalselt polüpürrooli juhtivust.

3. Andmesalvestus polümeerses memristor fiibris

Bakalaureusetöö autor pakub välja uue meetodi andmete salvestamiseks polümeerses memristor fiibris. Materjal koosneb elektrit juhtivast polümeerist ja heade mehaaniliste omadustega polümeerist, mis kokku moodustavad ühtlaselt disperseeritud komposiidi. Andmete salvestus realiseeritakse, muutes lokaalselt fiibri juhtivust ning sedasi tekitades fiibris juhtivusmusterid. Kõige lühem fiibri lõik, millel on ühtlane juhtivus, on üks mälorakk ehk memristor. Memristori juhtivust muudetakse kiiritades seda ultraviolettlaseriga. Fiibri lugemisel mõõdetakse fiibri memristorite juhtivusi ning kaardistatakse neist tekkivad juhtivusmusterid. Sellest on võimalik taastada sinna kirjutatud algandmed. Selles peatükis kirjeldatakse fiibrile andmete kirjutamise ja lugemise protsesse ning selleks vajalikku andmete kodeerimist. Lisaks vaadeldakse antud fiibri olulisi omadusi.

3.1 Andmete kodeerimine

Salvestatavad andmed on algselt bitisekvents kujul ehk ühtede ja nullide järjestus. Kodeerimisprotsessi eesmärk on viia see bitisekvents vastavusse takistuste sekventsiga, mis kirjutamisel realiseeritakse fiibri lõikude takistusena. Selleks tuleb määrata kvantimissügavus ehk see kui palju erinevaid takistusväärtusi kasutatakse. Lihtsaim variant on sügavuseks võtta kaks, seega null ja üks on vastavuses kahe erineva takistusväärtusega R_1 ja R_2 , nagu näha tabel 2 esimestel ridadel. Kasutatavad takistusväärtused on illustratiivsed.

Tabel 2. Bittide ja takistuste vastavustabel kvantimissügavus kahega.

Kvantimissügavus 2	
Bitt	Takistus
„1“	R_1 100 Ω
„0“	R_2 200 Ω

Kvantimissügavuse suurendamisega on võimalik andmetihedust suurendada, seega on kasulik kasutada võimalikult suurt sügavust ning sellisel juhul on tegemist mitmetasemelise mälorakuga. Näiteks kvantimissügavus kaheksa korral on vastavuses kaheksa erinevat

takistusväärtust ja kaheksa kolmest bitist koosnevat bitigruppi, näha tabelis 3. Kasutades sellist vastavustabelit, konverditakse bitisekvents takistussekventsiks.

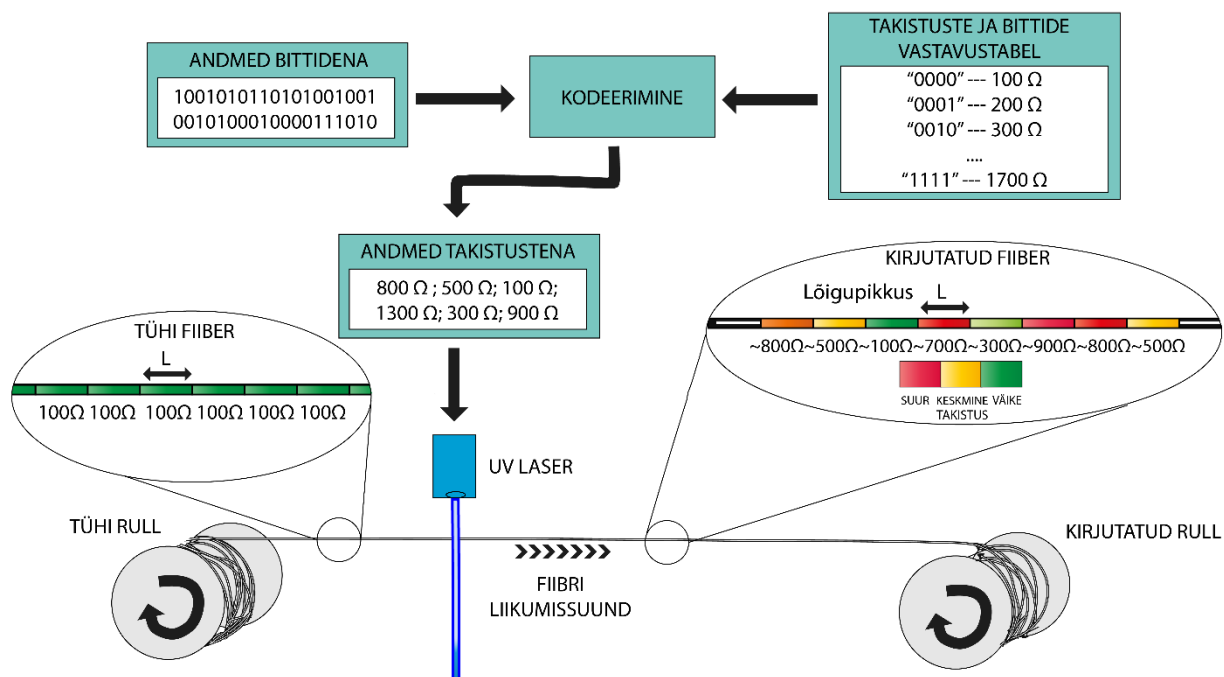
Tabel 3. Bittide ja takistuste vastavustabel kvantimissügavus kaheksaga.

Kvantimissügavus 8			
Bitigrupp	Takistus	Bitigrupp	Takistus
„000“	R ₁ 100 Ω	„100“	R ₅ 500 Ω
„001“	R ₂ 200 Ω	„101“	R ₆ 600 Ω
„010“	R ₃ 300 Ω	„110“	R ₇ 700 Ω
„011“	R ₄ 400 Ω	„111“	R ₈ 800 Ω

Kodeerimisel võib vajalikuks osutuda ka korduvate takistusväärtuste vältimine, sest fiibri lugemisel on keeruline ühte lõiku teisest eristada, kui neil on sama takistus. See on lihtsalt realiseeritav, lisades veel ühe takistusastme, mis representeerib korduvat väärtust. Lisaks võib kodeerimisel lisada ka veatuvastuskoode, mis dekodeerimisel võimaldavad tuvastada lugemisel tehtud vigu. Olenevalt kasutatavast süsteemist on võimalik kas vigu parandada või lugemisprotsessi korrata.

3.2 Fiibrile kirjutamine

Fiibri lõikude eritakistuste muutmiseks on võimalik kasutada erinevaid mehhanisme, kuid pakutakse välja kasutada ultraviolettlaserit, mis fotolüüsi abil tõstab kiiritatava segmendi takistust võrdeliselt kiirituse kogusega. Fiiber liiguks ühtlase kiirusega laserkiirest läbi ning laseri võimsust kontrollitakse ajas vastavalt sellele, kui suurt kiirituskogust on vaja, et fiibri lõigu takistus vastaks takistussekventsile olevale väärtusele. Protsessi tulemuseks on fiiber, millel on spetsiifiline takistumuster, nagu näha ka joonisel 9.



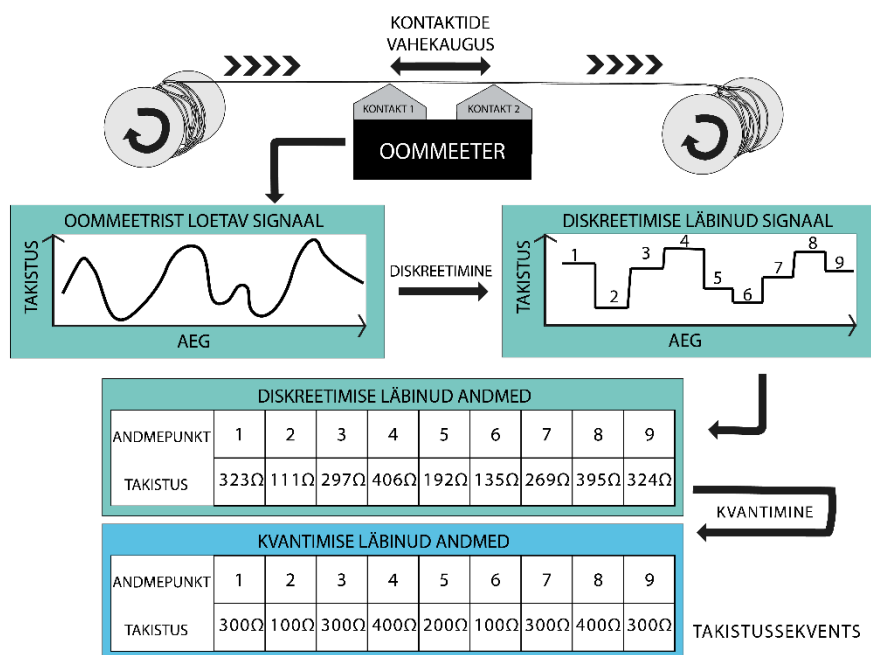
Joonis 9. Andmete kirjutamise protsess.

Enne andmeid tuleb fiibrile kirjutada ka stardiplokk, mis lugemisel sünkroniseerib protsessi ning näitab, mis takistusväärtusi andmete kirjutamiseks kasutatakse. Suurte andmehulkade puhul võib olla vajalik sünkroniseerimisblokke lisada ka oluliste andmete vahele. Andmerea lõppu võib lisada ka lõpuploki, mis näitab, et andmed on otsa saanud.

3.3 Fiibri lugemine

Fiibri lugemine tähendab, et mõõdetakse fiibri lõikude takistusi ning taastatakse tulemustest takistussekvents. Kui fiibri mõõtmised on piisavad ja takistusastmete vahed suured, saab seda teha käsitsi, asetades oommeetri kontaktid lõikude otstesse ning märkides üles tulemused. See protsess automatiseeritakse, liigutades fiibrit ühtlase kiirusega üle kontaktide, kuid saadav signaal on vaja diskreetida. Tulemused tuleb fikseerida vähemalt sama aja tagant, mis kulub, et fiiber liiguks edasi ühe lõigupikkuse jagu. Diskreetimissagedus sõltub fiibri liikumiskiirusest ja mäluuraku pikkusest. Diskreetimissuurus peab olema piisavalt suur, et eristada selgelt, mis diskreetse väärtusega ideaalis tegemist on. Oommeetrist tulev signaal sisaldab teatud määral müra ning väärtused on mingis suunas kallutatud ka tänu ebatäpsusele, mis on omane kirjutamisprotsessile. Seega on mõõdetud ja diskreeditud väärtused pidevad ning need muudab diskreetseteks kvantimine. Kvantimissügavus on juba määratud ning võimalikud diskreetsed väärtused teada, seega tuleb kasutada

kvantimisfunktsiooni. Tulemuseks on sobilikud väärtused, mis moodustavad takistussekvents. Kogu protsess on nähtav joonisel 10.



Joonis 10. Fiibri lugemise protsess.

3.4 Andmete dekodeerimine

Fiibri lugemisest saadud takistussekvents tuleb konverteerida algsele kujule ehk bitisekventsiks. Selleks kasutatakse sama bittide ja takistuste vastavustabelit, mida ka kodeerimise juures. Antud sammu juures võib teha veakontrolli, kui selleks vajalikud andmed kodeerimisel lisati. Dekodeerimisprotsessi lõpuks on taastatud algne bitisekvents ehk on lõppenud fiibri lugemise protsess.

3.5 Fiibri kirjeldus

Kirjeldatud protsessideks vajalik fiiber peab olema elektrit juhtiv ning juhtivus peab muutuma laseriga kiiritamisel. Selleks sobivad elektrit juhtivad polümeerid, näiteks polüpürrool. Lisaks peab olema fiiber mehaaniliselt piisavalt vastupidav, et seda oleks võimalik korduvalt poolile kerida ja poolilt maha kerida. Elektrit juhtivad polümeerid ei kannata sellist mehaanilist käitlemist ning selleks on vaja lisada fiibrile teine materjal, mis pakub vastavaid omadusi. Juhtivpolümeer ja lisamaterjal peavad moodustama stabiilse

komposiidi ning tootmine peaks olema lihtne ja odav, seega sobivad heade mehaaniliste omadustega polümeerid, näiteks tselluloos. Sellises komposiitfiibris peavad need kaks materjali olema fiibri piklikus suunas ühtlaselt jaotunud, sest see tagab fiibri ühtlase elektrijuhtivuse.

Välja on pakutud fiibrikujuline ehk ringikujulise ristlõikega andmekandja, sest see on ühe andmerea salvestamiseks kõige efektiivsem kuju ning lihtne toota ekstrudeerimise teel. Ekstrudeerimine on tootmistehnika, kus materjali pressitakse läbi düüsi. Kuid tehnoloogia töötaks ka teistsuguse kuju puhul, näiteks lint või plaat.

Fiibri kõige olulisem füüsiline karakteristik on diameeter, sest see määrab fiibri tugevuse, kuid ka fiibri iga lõigu takistuse. Takistus on pöördvõrdeline fiibri ristlõike pindalaga ehk pöördvõrdeline raadiuse ruuduga. See tähendab, et fiibri diameeter ei tohi varieeruda, muidu ei ole fiibri juhtivus enam igas lõigus võrdne. Toodetud fiibri juhtivus peab olema terves pikkuses väga sarnane, vastasel juhul on juba kirjutamata tühjas fiibris juhtivusmustrid, mis hakkavad häirima salvestatud andmete lugemist.

Üks memristor on fiibri kõige lühem lõik, millel on ühtlane juhtivus ning millele on salvestatud üks andmeühik. Memristori pikkus ehk lõigu pikkus sõltub sellest, kui väikest ala fiibrist on võimalik korraga kiiritada nõnda, et külgnevate lõikude eritakistus ei muutuks.

4. Eksperiment

Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks on tõestada, et on võimalik salvestada ja lugeda andmeid, kasutades eelmises peatükis kirjeldatud materjale ning protsesse. Käitlemise lihtsustamiseks viidi test läbi makroskaalas ning fiibri asemel valmistati polüpürrooli ja tselluloosi komposiidist lint.

4.1 Polüpürrool paberi valmistamine

Polüpürrool (PPy) paber koosneb kahest materjalist: tselluloosist filterpaberist ning sellele sadestatud polüpürroolist ehk tegemist on tselluloosi ja polüpürrooli komposiidiga. Selle komposiidi valmistamiseks kasutati aurufaasi sünteesi ehk oksüdeerijaga immutatud filterpaber viiakse kokku pürrooli aurudega, mille tulemusena tekib pinnale polüpürrooli kiht [26]. Eksperimendis immutati filterpaber ammooniumpersulfaadi (APS) lahuses, täpsemalt 0,4 M $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ lahuses. Immutatud paberilt eemaldati lahuse tilgad paberi raputamisega, misjärel paigutati paber kahest Petri tassist koosnevasse reaktoris. Reaktori põhja tilgutati pürrooli nii, et tilgad ei puutuks otseselt kokku filterpaberiga. Reaktorit soojendati elektripliidil temperatuurini 40°C, selleks et pürrool aurustustuks ning aurud täidaks reaktori.

Kui pürrooli aurud puutuvad kokku paberi pinnaga, reageerivad pürrooli ja APS molekulid ning tekivad polüpürrool ahelad. APS dopeerib ka tekkinud ahelad ning reaktsiooni tulemusena värvub paber mustaks. See protsess võtab aega umbes 15 minutit.

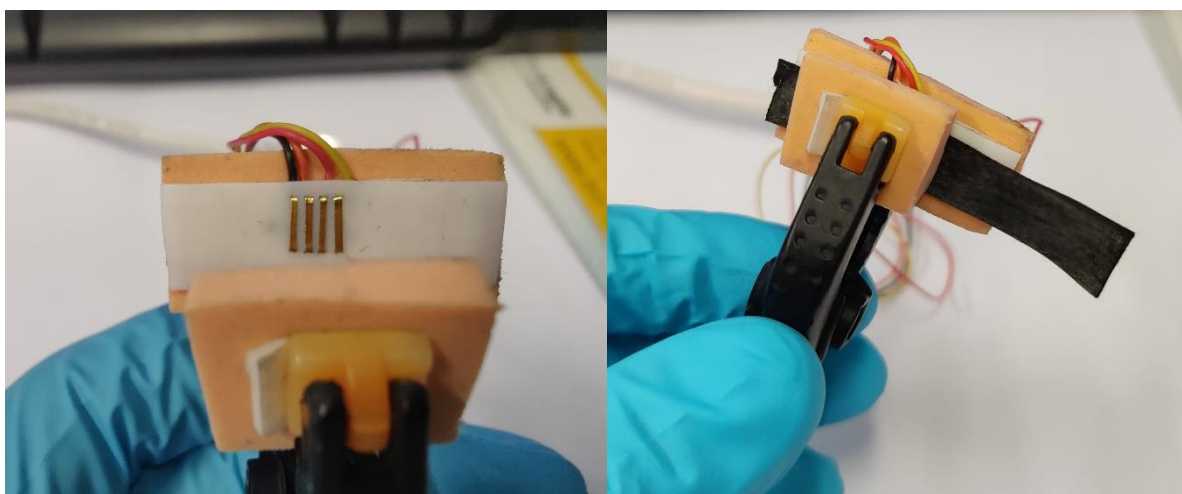
Peale 15 minuti möödumist eemaldati reaktor pliidilt ning PPy ja filterpaberi komposiit reaktorist. Komposiiti pesti korduvalt deioniseeritud veega ning seejärel kuivatati vaakumahjus. Peale vaakumahjus paberi kuivatamist oli selle värvust tumemust nagu näha ka jooniselt 11 ja filterpaberi mehaanilised omadused tundusid käega katsudes identsed tavalise filterpaberiga. Selles eksperimendis olid pabeririba mõõtmed 1 cm korda 6 cm.



Joonis 11. Polüpürrool paber.

4.2 PPy paberi juhtivuse mõõtmine

PPy paberi takistuste karakteriseerimiseks kasutati BioLogic BP-300 potentsiostaati. Sagedusvahemikus 100 kHz kuni 1 Hz mõõdeti paberi impedantsi ning sellest avaldati aktiivtakistus. Elektroodid paiknevad isoleerivas vahus, mis on kinnitatud plastikust klambrisse. Kasutusel olevate elektroodide vahekaugus on 4 mm, elektroode on näha joonisel 12. PPy paber asetati klambrisse, juhtiv kiht vastu elektroode, ning mõõtmise ajal klambrit ega paberit ei liigutatud.



Joonis 12. Mõõteklambri elektroodid ning PPy paber klambris.

Paberil mõõdetud takistused on vahemikus 3-4 k Ω , mis on suur takistus, arvestades kui lähedal on elektroodid, kuid elektroodide ja pinna kontakt ei pruudi olla kõige parem ning juhtiv kiht on paberil ka väga õhuke. Kuna juhtiv PPy kiht paberil on väga õhuke, siis on ristlõike pindala ka väga väike. Väike ristlõike pindala tähendab, et takistuse väärtus on suur, vt valem (1).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \rightarrow R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1)$$

ρ – eritakistus, R – takistus, A – ristlõike pindala, l – lõigupikkus.

PPy kihi paksus on teadmata, seega pole võimalik arvutada välja proovi täpset eritakistust, kuid Pang jt [28] on koostanud kokkuvõtva artikli, kus on sarnasete protsessidega valmistatud kilede erijuhtivus on suurusjärgus 10^{-5} S/cm kuni 10^{-4} S/cm ehk eritakistus 10^4 $\Omega \cdot \text{cm}$ kuni 10^5 $\Omega \cdot \text{cm}$. Uuritava objekti eritakistus on madalam, sest hinnates PPy kihi paksuseks umbkaudselt 100 μm , siis on eritakistus 100 $\Omega \cdot \text{cm}$. Nii suur erinevus tuleneb suure tõenäosusega erinevatest mõõtmismeetoditest, sünteesiprotsessidest või on kihi paksus hinnatust suurem. Õnneks ei ole täpne absoluutne eritakistus selle eksperimendi puhul oluline, sest vaja on ainult lõikude takistuste muutusi tuvastada.

4.3 Andmete kirjutamine polüpürrool paberile

PPy pabeririba mõõtmetest sõltuvalt jagati see neljaks segmendiks, see tähendab, et ribal on neli mäluakku ehk memristorit. Mõõtmisel selgus, et lõikudes mõõdetavad takistused ei ole võrdsed, vaid kasvavad ribal vasakult paremale, mis tähendab, et PPy süntees ei toimunud ühtlaselt. Sellepärast otsustati kasutada minimaalset kvantimissügavust ning mõõta takistuse muutust, mitte selle absoluutset väärtust.

Neljast memristorist koosnevale lindile on võimalik kirjutada, kvantimissügavusel kaks, neli bitti informatsiooni. Salvestamiseks valiti suvaline bitisekvents „1010“, milles pole kõrvuti kahte sama väärtusega bitti, et vältida võimalikku segadust mõõtmisel.

Kodeerimiseks kasutati järgnevat kvantimise algoritmi:

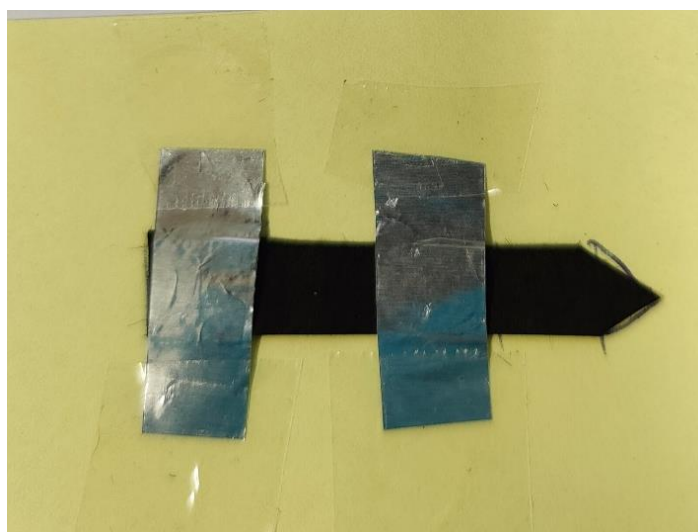
$$B(i) = \begin{cases} 1, & \Delta R_i < 1 \text{ k}\Omega \\ 0, & \Delta R_i > 1 \text{ k}\Omega \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta R = |R_{L\ddot{o}pp} - R_{Alg}|$$

ΔR – takistuse muut, R_{Alg} – algne takistus, $R_{L\ddot{o}pp}$ – lõplik takistus.

Memristori bitiväärtus (“1” või “0”) sõltub memristori takistuse muutust. Kui takistuse muutus on alla ühe $\text{k}\Omega$, siis on bitiväärtus “1”, vastasel juhul “0”. Saadav takistussekvents on siis $\{\Delta R_1; \Delta R_2; \Delta R_3; \Delta R_4\}$, kus ΔR_1 ja ΔR_3 on väiksemad kui $1 \text{ k}\Omega$ ning ΔR_2 ja ΔR_4 on

suuremad kui 1 k Ω . Enne andmete kirjutamist on kõigi memristorite muut null, bitiväärtus seega “1”. Mälurakud, mida on vaja muuta “0“-iks, tuleb UV-ga kiiritada, kuni tekib vähemalt ühe k Ω muutus selle takistuses. „1010“ sekventsiga kirjutamiseks tuleb kiiritada teist ja neljandat lõiku ning ei tohi kiiritada esimest ja kolmandat lõiku. PPy paberi valikuliseks kiiritamiseks valmistati rakis, mis kaitseb esimest ja kolmandat lõiku UV-kiirguse eest, kasutades alumiiniumist fooliumit, nagu on näha joonisel 13.



Joonis 13. PPy paberriba kiiritamise rakises.

Foolium peegeldab kiirgust ja ei lase sellel jõuda all oleva paberini. UV-kiirguse allikaks olid kolm UV-lampi (Philips TUV T8 15,5 W), mille peamine eritatava kiirguse lainepikkus on 250 nm. Lambid asuvad metallist korpuses, mille alumisel küljel asub 5 cm x 5 cm mõõtmetega avavus, mis seisab 10 cm kõrgusel aluspinnast. Kiiritamise rakises olev memristor riba asetati Petri tassile ning kiiritati 60 minutit. Eelnevates eksperimentides tuvastati, et see aeg on piisav 1 k Ω takistuse muutuse esile kutsumiseks. Peale seda eemaldati riba rakisest ning andmete kirjutamise protsess oli lõpetatud.

4.4 Andmete lugemine polüpürrool paberilt

Kirjutatud ribalt andmete lugemiseks tuleb mõõta iga memristori takistus ning taastada sellest bitisekvents. Selleks mõõdeti iga mäluraku keskmine takistus ehk $R_{L\text{öpp}}$. Sellest tulenevalt arvutati iga segmenti ΔR ehk takistuse muut ning, kasutades eelnevalt mainitud algoritmi (2), vastav bitiväärtus. Tulemused on nähtaval tabelis 4.

Tabel 4. PPy paberi segmentide väärtuste tabel.

Segment nr	1	2	3	4
Kirjutatav bitt	“1“	“0“	“1“	“0“
$R_{Alg} (k\Omega)$	3,0	2,9	3,6	4,2
$R_{L\ddot{o}pp} (k\Omega)$	3,2	4,1	3,8	6,3
$\Delta R (k\Omega)$	0,2	1,2	0,2	2,1
Loetud bitt	“1“	“0“	“1“	“0“

Katse tulemusena õnnestus taastada esialgne bitisekvents „1010“ PPy paberiribalt. Esimese ja kolmanda memristori takistuste muut on 0,2 k Ω , mis on alla ühe ehk bitiväärtuseks jääb “1“, kuid teise ning neljanda biti takistuse muutus ületab 1 k Ω piiri ning seega loetakse need “0“-ideks. Esimese ja kolmanda memristori takistuse 0,2 k Ω muutus võib tuleneda sellest, et kiiritamisel kiirgavad lambid lisaks UV-kiirgusele ka infrapunakiirgust, mis kuumutas kogu riba. Teise ja neljanda memristori erinevad muudud võivad tuleneda sellest, et algsed takistused olid erinevad ning takistuse muutumine pole lineaarne protsess.

4.5 Eksperimendi kokkuvõte

Polüpürroolist ja tselluloosist koosnevasse memristor linti salvestati neli bitti informatsiooni ning lugemisel taastati edukalt kogu salvestatud bitisekvents. Eksperimendiga tõestati, et väljapakutud tehnoloogia on andmete salvestamiseks realiseeritav.

5. Analüüs

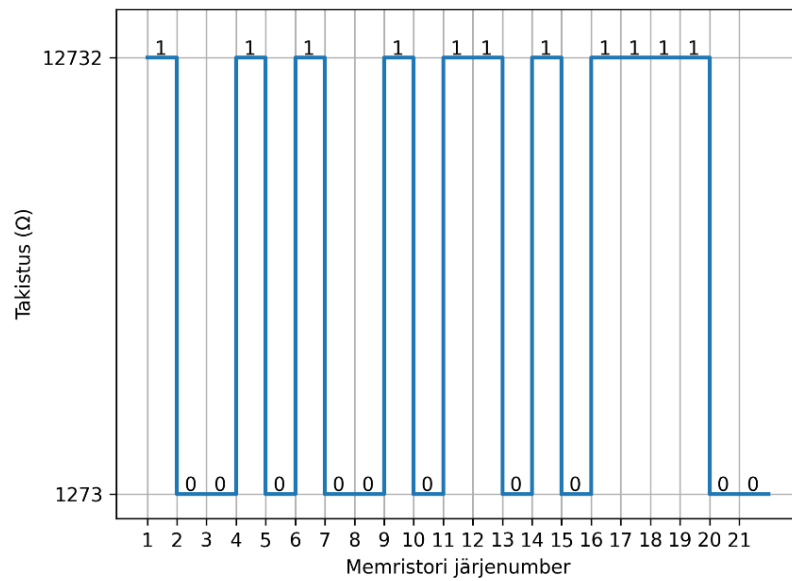
Selles peatükis arutletakse, millised on väljapakutud andmesalvestustehnoloogia omadused ning mis on limiteerivad faktorid selle võimekusel. Polümeerset memristor fiibrit võrreldakse kasutusel olevate andmekandjatega. Analüüsi läbiviimiseks loodi arvutiprogramm, millega on võimalik lihtsalt arvutada mälufiibri erinevaid omadusi vastavalt etteantud parameetritele ning visualiseerida sõltuvusi erinevate fiibri omaduste vahel. Kasutati programmeerimiskeelt Python ja visualiseerimisteeki Matplotlib. Programmi kood on nähtav lisas I.

5.1 Fiibri omadused

Fiibri omadusi määravad parameetrid on fiibri diameeter, mäluraku pikkus, algne eritakistus, maksimaalne eritakistus ja takistusastmete arv. Diameeter ja mäluraku pikkus on ühe memristori mõõtmed. Algne eritakistus on toodetud tühja fiibri eritakistus, mis on kogu fiibri ulatuses sama. Maksimaalne eritakistus on kõige suurem eritakistus, milleni on võimalik algset eritakistust muuta kiiritades fiibrit UV-laseriga. Takistusastmete arv ehk ka kvantimissügavus on maksimaalne arv erinevaid eritakistuse väärtusi, mis asuvad algse ja maksimaalse eritakistuse vahel. Seda tingimusel, et erinevaid astmeid on võimalik kiiritamisega saavutada ja lugemisel eristada. Memristori mõõtmed ja eritakistus määravad selle memristori takistuse vastavalt eritakistuse valemile (1).

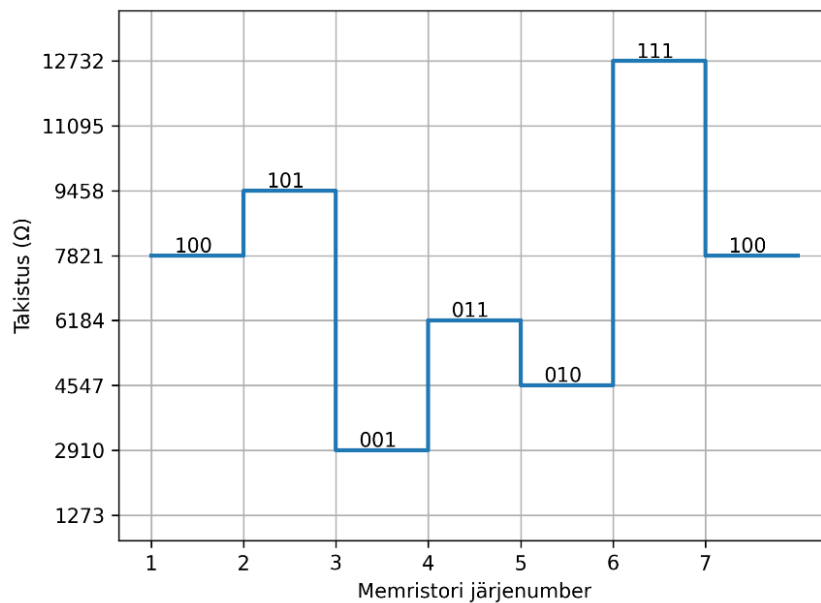
5.1.1 Andmetihedus

Kui kirjutada fiibrile, mille diameeter on 1 mm, memristori pikkus 1 mm, algne eritakistus $1 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, maksimaalne eritakistus $10 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ning takistusastmete arv 2, bitisekvents "100101001011010111100", siis on võimalike memristorite takistusi näha joonisel 14.



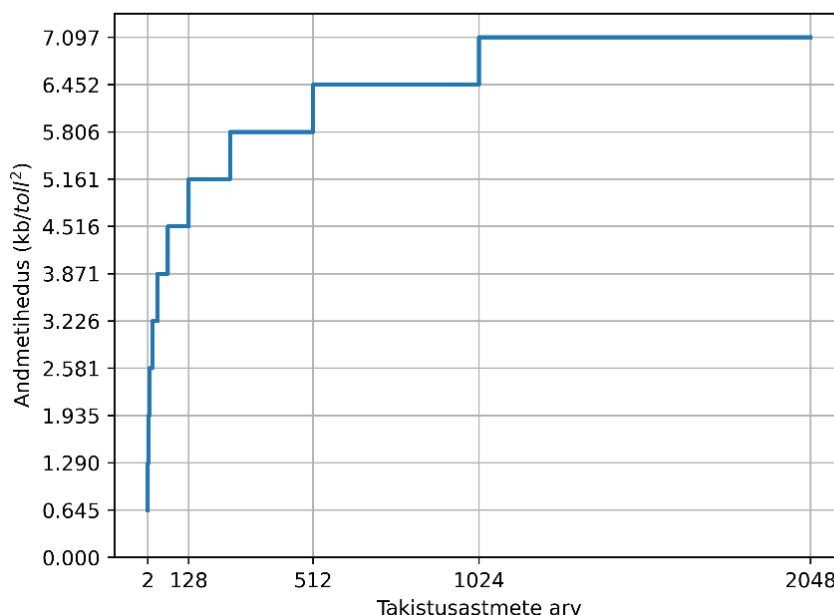
Joonis 14. Memristorite takistused ja memristorite järjenumbrid kahe takistusastme korral.

Võimalikke takistusväärtuseid on ainult kaks, seega saab ühele memristorile kirjutada ainult ühe biti informatsiooni. Kuid kui suurendada takistusastmete arvu kaheksani, on võimalik sama fiibri ühele memristorile kirjutada 3 bitti, seda näeb joonisel 15. Igale segmendile on lisatud ka bitigrupp, mis selles memristoris salvestatud on.



Joonis 15. Memristorite takistused ja memristorite järjenumbrid kaheksa takistusastme korral.

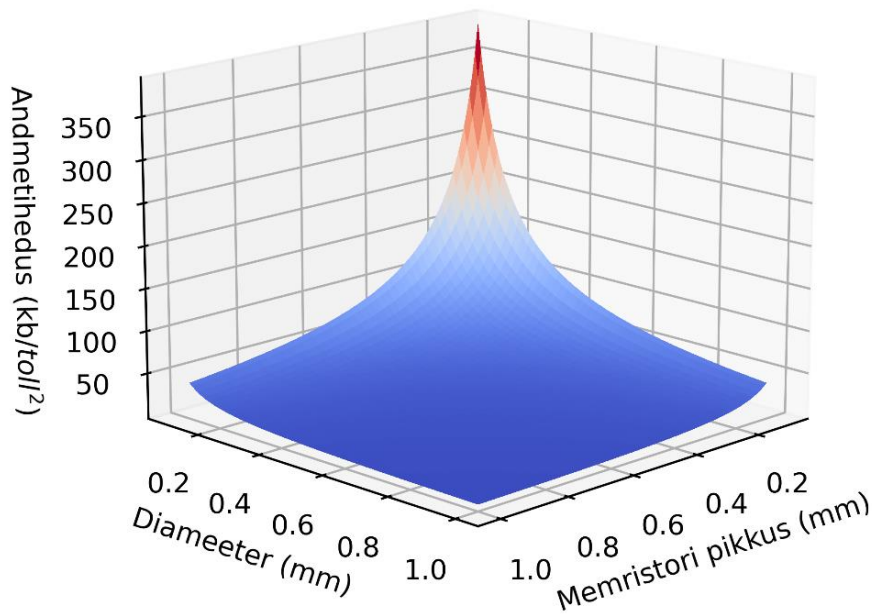
Memristorite arv, mis kulus bitisekventsi salvestamiseks, vähenes tänu takistusastmete suurendamisele kolm korda. See tähendab, et samale fiibri lõigule on võimalik salvestada rohkem andmeid ehk andmetihedus kasvab takistusastmete suurendamisel. See sõltuvus ei ole siiski lineaarne, nagu näha selgelt joonisel 16.



Joonis 16. Andmetiheduse sõltuvus takistusastmete arvust.

Et salvestada igas memristoris ühe biti võrra rohkem informatsiooni, tuleb kahekordistada takistusastmete arvu. Sellepärast on ka graafikul olev joon astmeline, andmetihedus kasvab hüppeliselt siis, kui takistusastmete arv on võrdne 2^n , kus n on bittide arv mälurakus ehk naturaalarv. Memristoril salvestatavale bitigrupile ühe biti lisamine suurendab andmetihedust märgatavalt, kui bitigrupid on väiksed, kuid mida pikemad on bitigrupid, seda väiksem on ühe biti lisamise mõju andmetihedusele.

Seega on oluline suure andmetiheduse saavutamiseks kasutada võimalikult suurt takistusastmete arvu, kuid see ei tohiks mõjutada fiibri diameetrit ja memristori pikkust, sest need määravad samuti andmetiheduse. Andmetiheduse sõltuvust fiibri diameetrist ja memristori pikkusest on näha joonisel 17.



Joonis 17. Andmetiheduse sõltuvus fiibri diameetrist ja memristori pikkusest.

Mida väiksemad on memristori mõõtmed, seda suurem on andmetihedus, sest rohkem memristoreid mahub samale pindalale. Memristori projektsiooni pindala ehk diameeter korrutatud pikkusega on lineaarses pöördvõrdelises sõltuvuses andmetihedusega. Seega, et suurendada fiibri andmetihedust, tuleb muuta memristori mõõtmed võimalikult väikesteks ja kasutada võimalikult palju takistusastmeid.

5.1.2 Salvestus- ja lugemiskiirus

Salvestus- ja lugemiskiirus sõltuvad sellest, kui paljude memristoritega on võimalik vastavat protsessi igas sekundis läbi viia. Mida rohkem mälurakke on võimalik sekundi jooksul töödelda, seda suurem on töötlemisega seotud andmevoog. Selle arvu määravad ühe mäluraku töötlemiseks kuluv aeg ja kiirus, millega fiiber läbi töötlemisala liigub. Mida pikem on aeg, mis kulub ühele memristorile kirjutamiseks või sellelt lugemiseks, seda vähem on võimalik seda protsessi ühes sekundis korrata. Kui töötlemiseks kuluv aeg on väga väike, piirab andmevoogu see, kui palju mälurakke läbib sekundis töötlemispiirkonna. Selleks, et fiibrile kirjutada, peab memristor asuma laserkiires ning mõõtmisel oommeetri kontaktide vahel. Fiiber liigub mingi kiirusega läbi töötlemispiirkonna, seega sekundi jooksul on võimalik töödelda fiibri lõiku, mille pikkus on võrdne sekundi jooksul läbitud fiibri teepikkusega. Selle lõigu sisse mahub kindel arv memristoreid, vastavalt mäluraku pikkusele. Andmevoog ongi määratud fiibri liikumiskiiruse ja fiibri lineaarse andmetihedusega (bitti meetri kohta, b/m), tingimusel, et sel kiirusel on võimalik viia läbi

salvestus- või lugemisprotsesse. Salvestus- ja lugemiskiiruse maksimeerimiseks on vaja suurendada lineaarset andmetihedust ja fiibri liikumiskiirust ning minimeerida memristori töötlemiseks kuluvat aega.

5.2 Teoreetilised fiibri omaduste piirväärtused

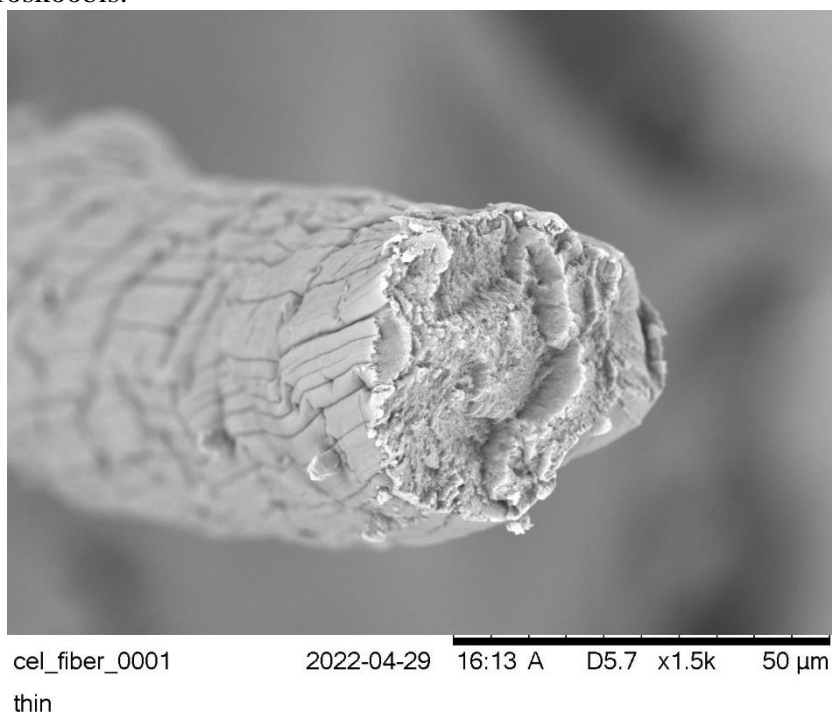
Ideaalne andmekandja on lõputult andmetihe, selle salvestus- ja lugemiskiirus on piiramatult ning andmed püsivad sellel igavesti. Samal ajal on pöördumiskiirus olematu ning maksumus nullilähedane. Sellist salvestusmeediumit veel ei eksisteeri ja igal andmekandjal on mingid eelised, kuid ka puudujäägid. Millised võiksid olla ideaalse polümeerse memristor fiibri omadused?

Käesolevas töös ei anta täpsemat hinnangut fiibri andmete kestvusele, sest sellist süsteemi pole teadaolevalt varem uuritud ning seega on hinnangu andmiseks vaja läbi viia eluea uuringud. Selle töö raames neid uuringuid ei tehtud, kuid andmed häviksid, kui lasta fiibril pikalt kokku puutuda UV-valgusega, sest see mõjutaks fiibri eritakistusi. Valguse eest kaitseks valguskindel korpus, milles fiibrit hoiustatakse. Lisaks ei uurita sellise andmekandja hinna kujunemist, sest on väga raske ennustada tootmisega seotud kulusid. Kuid toormaterjali hinnad on pigem odavad, tselluloosi saab hankida näiteks puuvillast, mis on 99 % tselluloos ning maksab umbes 10 €/kg [30], kuid võib ka taaskasutada näiteks paberitööstuse jääke. Pürrool on palju haruldasem reagent ja selle hind väga puhtal kujul ning väikese koguse korral on 800 €/kg [31], kuid suuremate koguste korral võib hind langeda umbes 200 €/kg-ni. Pürrooli kulub siiski tõenäoliselt tootmises palju vähem ja suurem osa fiibrist koosneb tselluloosist.

Pöördumisaeg ehk keskmine aeg, mis kulub lugemiskäsust kuni andmete lugemiseni, on kõikide lineaarsetel salvestusseadmetel väga pikk. See kehtib ka magnetlintide puhul, sest vajalikud andmed võivad asuda lindi eri otstel ning nendele ligi pääsemiseks tuleb terve lint läbi kerida. Sellepärast ei kasutata antud mäluseadmeid suvapöörduseks (RAM), sest oleks väga ebaefektiivne. Pigem kasutatakse selliseid andmekandjaid arhiveerimiseks ja külmade andmete talletamiseks [32]. Seega pole pöördumisaaja optimeerimine memristor fiibri puhul mõttekas.

5.2.1 Teoreetiline maksimaalne andmetihedus

Fiibri andmetihedus sõltub diameetrist, memristori pikkusest ja takistusastmete arvust. Andmetiheduse suurendamise eesmärgil võiks olla fiibri diameeter ühe monomeeri molekuli suurune, nagu DNA puhul, kuid sellisel juhul pole fiiber pikem kui üks polümeeri ahel ning ka mõiste fiiber ei ole siinkohal enam õige. Fiiber, mille pikkus oleks meetrites või kilomeetrites ja mis oleks mehaaniliselt piisavalt tugev, et kannatada käitlemist, peab koosnema paljudest kõrvuti paiknevatest ahelatest. Täpsed mehaanilised nõuded fiibrile on teadmata, kuid eksperimendi käigus õnnestus valmistada ekstrusiooni teel tselluloosi fiibrit, mille diameeter oli 42 μm . Joonisel 18 on näha selle fiibri ristlõige skaneerivas elektronmikroskoobis.



Joonis 18. Ekstrudeeritud tselluloosi fiiber elektronmikroskoobis.

Eeldatakse, et parimal juhul võiks olla mälufiibri diameeter võrdeline valmistatud tselluloosi fiibriga ehk umbes 50 μm , kuid tegelikkuses võib olla ka vajalik kasutada suuremat diameetrit.

Mäluraku pikkus fiibril võiks ideaalis olla samuti molekulide skaalal, et mahutada võimalikult palju memristoreid väikese ala sisse. Kuid sellised mõõtmed pole realiseeritavad, sest piirangu seab kasutatava laseri koondamine väiksele alale. Koondades valgust väikesesse punkti, tekivad difraktsiooni tõttu selle punkti ümber valgusrõngad. Seda nähtust tuntakse Airy kettana ning see piirab minimaalse valguspunkti suuruse. Rayleigh

kriteeriumiga on võimalik arvutada selle difraktsiooni esimese intensiivsuse miinimumi kaugus keskpunktist. Selle raadiuse sees on suurem osa valguse intensiivsusest. Täpne raadius sõltub valguse lainepikkusest ning valguse koondamiseks kasutatavast optikast [33]. Üldiselt jääb see raadius valguse lainepikkusega samasse suurusjärku, mis juhul on valguse täpi diameeter kaks korda suurem kui lainepikkus.

Eksperimentaalses osas kasutatud UV-valguse lainepikkus oli 250 nm ehk võib eeldada, et kõige väiksem ala, millele on võimalik koondada enamik valguse intensiivsusest, on umbes 500 nm. Seega ka kõige väiksem lõik fiibrist, mida on võimalik kiiritada, on pikkusega 0,5 μm . Ehk memristori pikkus on 0,5 μm . Tuleb pöörata ka tähelepanu sellele, et nii väikese pikkuse korral ei pruugi olla võimalik mõõta korraga ainult ühte memristorit, vaid mõõdetakse hoopis fiibri lõiku, mis koosneb mitmest mälurakust. Kuna memristorid käituvad takistitena ning on asetatud jadana, siis nende takistused liituvad ja mõõdetakse lõigus olevate memristorite takistuste summat. Mõõtmise alguses mõõdetakse alguses tühja fiibrit, milles olevate memristorite juhtivus on teada ja mõõtmisalasse sisenevad andmeid kandvad memristorid ükshaaval. Kuni andmeid kandvad memristorid pole täitnud kogu mõõtmisala, saab tuvastada sisenevate memristorite takistusi selle järgi kui palju summaarne takistus kasvas. Kui tühjad memristorid on otsa saanud, lahkub mõõtmisalast juba määratud takistusega memristor ning siseneb tundmatu memristor, kuid summaarse takistuse muutusest on võimalik siiski leida tundmatu memristori takistus.

Sellega on määratud ühe mäluraku mõõtmed, kuid andmetiheduse arvutamiseks on vaja teada, kui mitu andmeühikut antud mälurakus hoiustatakse. Puudub viimane vajalik fiibri parameeter: takistusastmete arv. Kirjutamisel sõltub maksimaalne takistusastmete arv sellest, kui täpselt on võimalik kontrollida kiirguse kogust, mis mälurakku tabab, ehk laseri intensiivsust. Lugemisel on vaja neid erinevaid takistusväärtusi üksteisest eristada ehk mõõtemääramatus peab olema vähemalt kaks korda väiksem kui takistusväärtuste erinevus. Mõlemad need kriteeriumid sõltuvad kasutatava riistvara omadustest, mistõttu pole võimalik konkreetset astmete arvu hinnata. Seega vaadeldakse kahte erinevat stsenaariumi: esimeses on võimalik saavutada ainult väike arv takistusastmeid, näiteks 16, ning teises on võimalik saavutada suur arv takistusastmeid, näiteks 2048. Kui takistusastmeid on 16, on ühes memristoris salvestatud 4 bitti ning 2048 puhul 11 bitti.

Andmetihedus on arvutatav, jagades mälurakus salvestatavate bittide arvu mäluraku projektsiooni pindalaga. Eelnevate eelduste põhjal on ideaalse fiibri diameeter 50 μm ning

mäluraku pikkus 0,5 μm , pindala on seega 25 μm^2 . Kui takistusastmeid on 16, siis on andmetihedus 160 000 bitti ruutmillimeetris ehk 160 kb/mm², kuid andmekandjate tööstuses kasutatakse pindala ühikuna ruuttolli, ehk 103 Mb/toll². Kui takistusastmeid on 2048, on andmetihedus 440 kb/mm² ehk 284 Mb/toll².

Andmetihedust on võimalik suurendada, kui vähendada fiibri diameetrit, kuid sellisel juhul ei saa eeldada fiibrilt mõistlikke mehaanilisi omadusi. Tasub eelistada kandjana linti, mille pinnal oleksid n-ö fiibrid või memristoridest koosnevad read. Need peaksid olema omavahel eraldatud mittejuhtiva reaga. Sellises süsteemis oleks mäluraku laius võrdne pikkusega, kuid tuleb arvestada ka eraldusrida, mille laius võib olla sama suur. Sel juhul oleks mäluraku laius 1 μm ja pikkus 0,5 μm ning kasutades 16 takistusastet, oleks andmetihedus umbes 5000 Mb/toll² ehk 5 Gb/toll².

5.2.2 Teoreetiline salvestus- ja lugemiskiirus

Salvestus- ja lugemiskiirus sõltub kasutatava fiibri lineaarsest andmetihedusest ning fiibri liikumiskiirusest eeldusel, et sel kiirusel on võimalik läbi viia kirjutamis- ja mõõtmisprotsesse. Nende protsesside tööajad sõltuvad kasutatavast riistvarast, seega pole teada maksimaalne kiirus, mida kasutades saaks kirjutamist ja lugemist läbi viia. Need protsessid on väga sarnased magnetlindil andmete salvestamise ja lugemisega. Magnetlindi standardi LTO ühe tootja Fujifilm-i andmetel kasutatakse lugemisel lindi kiirust 15 km/h ehk umbes 4,1 m/s [34]. Ehk võib eeldada, et memristor fiibriga on võimalik saavutada sarnaseid kiirusi, umbes 4 m/s.

Fiibril, mille diameeter on 50 μm , mäluraku pikkus 0,5 μm ja takistusastmeid 16, on lineaarne andmetihedus 8000 b/mm. Kui fiibri liikumiskiirus on 4 m/s, siis lugemiskiirus sellisel süsteemil on 32 megabitti sekundis ehk 32 Mb/s. Fiibril takistusastmega 2048 on lineaarne andmetihedus 22 000 b/mm ning lugemiskiirus seega 88 Mb/s. Salvestus- ja lugemiskiirust on võimalik suurendada, kui tõsta fiibri lineaarset andmetihedust või liikumiskiirust. Lineaarse andmetiheduse tõstmiseks peab alandama mäluraku pikkust, mis on piiratud kiiritamiseks kasutatava lainepikkusega, seega tuleks kasutada kiiritamiseks lühema lainepikkusega laserit. Ei ole teada, kas liikumiskiirust on võimalik tõsta, sest see sõltub töötlemiseks kasutatavast riistvarast.

5.3 Võrdlus olemasolevate andmekandjatega

Polümeerne memristor fiiber ei sarnane tööpõhimõttelt mitte ühelegi kasutusel olevale andmekandjale. Ei ole leitud ühtegi allikat, kus oleks kirjeldatud polümeerse memristori kiiritamisprotsessi andmete salvestamise eesmärgil. Kõige sarnasem andmekandja on magnetlint, sest tegemist on samuti lineaarse andmekandjaga, kuid fiibri asemel kasutatakse linti. Magnetlint on samuti komposiitmaterjal, mille üks komponent on polümeer, kuid mälurakud koosnevad siiski ferromagnetlistest osakestest. Andmed salvestatakse osakeste magnetilises polarisatsioonis. Memristor fiibris on andmed salvestatud mäluraku juhtivuses ning juhtivust muudetakse tegelikult lõhkudes ja luues polümeeri ahelate vahelisi kovalentseid sidemeid. Sellepärast sarnaneb memristor rohkem DNA-le, sest ka DNA-s kannavad infot kovalentsed sidemed, kuid on oluline, mis molekul on polümeeri ahelaga liitunud. Fiibri puhul mõõdetakse lõhutud ja moodustunud sidemete arvu mäluraku piirkonnas, kasutades selleks elektrijuhtivust, ning selle sõltuvust moodustunud sidemetest. Järelikult on info salvestatud keemilistes sidemetes, kuid seda tuvastatakse juhtivuse näol.

Memristor fiiber sarnaneb magnetlindile ka selle poolest, et andmekandja lineaarse olemuse tõttu on mõlemal väga pikk pöördumisaeg, seega sobivad mõlemad külmade andmete talletamiseks, andmete transportimiseks ja varundamiseks. Sellepärast on magnetlint andmekandja, millele memristor fiiber võiks olla potentsiaalne alternatiiv. Kuid selleks, et magnetlindiga konkureerida, peavad olema fiibri omadused sama head või veel paremad.

Hetkel pole võimalik võrrelda tehnoloogiate hindu ega eluea pikkust, sest neid omadusi tuleb fiibri puhul veel uurida. Andmete ohutuse aspektist võib fiibril olla eelis, sest andmeid ei saa kustuda magnetilise rünnakuga. Rünnaku korral orienteeruvad magnetlinde mälurakud tugeva välise magnetväljaga ning info nendel kaob. Kuid fiiber on omakorda ohustatud tugevast UV-valgusest, ka päiksevalgusest. Ka LTO standard pakub ainukirjutuse varianti (WORM), kuid füüsiliselt on võimalik andmeid siiski uuesti kirjutada. Memristor fiibri puhul ei saa uusi andmeid vanade peale kirjutada, vähemalt mitte nõnda, et seda muutmist ei oleks võimalik tuvastada.

LTO-9 on kõige uuem ja võimekam magnetlinde standard ning tootja Fujifilm andmetel on selle pindalaline andmetihedus 12 Gb/toll² [34], mis on umbes 40 korda suurem kui 2048 takistusastmega fiibri andmetihedus (284 Mb/toll²). Nagu ka varasemalt arutatud, ei ole võimalik fiibri andmetihedust suurendada, kuid polümeerse memristor lindi puhul võiks see

küündida 5 Gb/toll², mis on väga lähedal viimase generatsiooni magnetlindi andmetihedusele. See on parem kui 2015 aastal väljastatud LTO-7, millel andmetihedus on 4,3 Gb/toll². Memristor lindi andmetiheduse tõstmiseks tuleks vähendada mälu raku mõõtmeid, mis on piiratud kasutatava laseri lainepikkusega, seega tuleks selleks kasutada lühema lainepikkusega laserit. Eksperimentaalselt pole lühema lainepikkuse mõju juhtivusele testitud, kuid see peaks töötama analoogselt 250 nm lainepikkusele.

LTO-9 lugemiskiirus on 400 MB/s ehk 3200 Mb/s ning lindi kiirus on 15 km/h ehk umbes 4 m/s [34]. Arvutatud 16 ja 2048 lugemiskiirused olid vastavalt 32 Mb/s ja 88 Mb/s. Mõlemal juhul on lugemiskiirus palju madalam kui LTO-9 lugemiskiirus, kuid magnetlindil ei loeta korraga ainult ühte andmerida nagu fiibri puhul, vaid korraga loetakse 32 rida. See on võrdne sellega, kui loetaks korraga 32 fiibrit, mis juhul oleksid lugemiskiirused vastavalt 1024 Mb/s ja 2816 Mb/s. 2048 takistusastmega fiiber on väga lähedal LTO-9 lugemiskiirusele ning on isegi suurem LTO-7 lugemiskiirusest (2400 Mb/s [34]). Kui suurendada takistusastmeid 8192-ni, siis oleks 32 fiibri lugemiskiirus 3300 Mb/s. Teine võimalus oleks suurendada lineaarset andmetihedust, mille saavutamiseks peab kasutama lühema lainepikkusega laserit.

Analüüsiga selgus, et polümeerse memristor tehnoloogiaga on teoreetiliselt võimalik saavutada sama hea andmetihedus ning lugemiskiirus kui magnetlindi tehnoloogia LTO kõige uuemal standardil LTO-9. See nõuab lühema lainepikkuse kui 250 nm kasutamist fiibri kiiritamisel ning eeldab ka paljude takistusastmete kasutamist. Lisaks selgus, et valitud andmekandja fiibriline kuju ei pruugi olla parim. Fiibri diameeter peab olema võrdlemisi suur, et fiiber taluks käitlemist, kuid seetõttu on suur ka mälu raku pindala. Parema alternatiiv on kasutada memristor linti, millel paikneks palju memristorite ridu. Selline kuju võimaldab saavutada suuremat andmetihedust ning ka salvestus- ja lugemiskiirust, sest korraga on võimalik töödelda mitut erinevates ridades paiknevat memristorit.

Polümeerse memristor fiibri või lindi eelisteks magnetlindi ees on see, et magnetilise rünnakuga ei ole võimalik andmeid kustutada ning lisaks ainukirjutusmälu ei ole lihtsalt seatud piirang, vaid füüsikaline piirang, mis on omane sellele tehnoloogiale. Seetõttu pole andmete mahuline muutmine võimalik nõnda, et seda lugemisel ei tuvastaks. Potentsiaalselt pakuks polümeerne memristor fiiber ka ohutut salvestust pikemaks ajaks, sest andmed on salvestatud keemilistes sidemetes, mis võivad olla stabiilsemad magnetmomentidest. Antud aspekt nõuab põhjalikku uurimist.

6. Kokkuvõte

Töö autorile teadaolevalt kirjeldati käesolevas töös esimest korda uudet andmesalvestustehnoloogiat ning tõestati eksperimentaalselt, et kirjeldatud materjalide ning meetoditega on võimalik andmete salvestamine ja lugemine realiseerida. Kirjutatud arvutiprogrammi abil viidi läbi analüüs ning uuriti andmekandja omadusi ning seoseid erinevate omaduste vahel. Analüüsi tulemusena leiti, et polümeerne memristor fiiber sarnaneb olemasolevatest andmekandjatest enim magnetlindile ning teoreetiliselt on võimalik saavutada sama andmetihedus ja salvestus- ja lugemiskiirus. Selliste omaduste saavutamiseks ei pruugi fiibriline kuju olla parim ning tasuks edasi uurida sama tehnoloogia rakendamist lindikujulisel andmekandjal. Polümeerse memristor fiibri eelistena toodi välja andmete turvalisus, sest seda ei ohusta magnetiline rünnak, ning lisaks kaitseb andmeid juhuslike või pahatahtlike muutumiste eest ainukirjutuse füüsikaline olemus.

Töö edasiseks arendamiseks tuleks uurida lähemalt andmete eluiga fiibris, sest potentsiaalselt võiks tegu olla ühe andmekandja suure eelisega. Lisaks tuleks alustada tehnoloogia rakendusliku uurimisega ehk andmekandja tootmise arendamise ning kirjutamis- ja lugemisseadmete disainimise ja prototüüpide ehitamisega. Kui on võimalik tõestada, et teoreetilise andmetiheduse ja andmevookiirusega andmekandja on realiseeritav, oleks mõttekas alustada ka tehnoloogia kommersialiseerimisega. Tehnoloogia võiks pakkuda paremat alternatiivi turul olevatele ning see aitaks täita aina kasvavat defitsiiti maailma andmesalvestusmahus.

7. Viidatud kirjandus

- [1] W. A. Bhat, 'Is a Data-Capacity Gap Inevitable in Big Data Storage?', *Computer*, vol. 51, no. 9, pp. 54–62, Sep. 2018, doi: 10.1109/MC.2018.3620975.
- [2] S. Taluja, J. Bhupal, and S. R. Krishnan, 'A Survey Paper on DNA-Based Data Storage', in *2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*, Feb. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/ic-ETITE47903.2020.62.
- [3] P. M. Stanley, L. M. Strittmatter, A. M. Vickers, and K. C. K. Lee, 'Decoding DNA data storage for investment', *Biotechnol. Adv.*, vol. 45, p. 107639, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.biotechadv.2020.107639.
- [4] D. Reinsel, J. Gantz, and J. Rydning, 'The Digitization of the World from Edge to Core', International Data Corporation (IDC), 2018.
- [5] P. Goodwin, 'Tape and Cloud: Solving Storage Problems in the Zettabyte Era of Data', International Data Corporation (IDC), Jun. 2019.
- [6] M. Lehtla, 'Sissejuhatus digitaaltehnikasse: Pooljuhtmäluuseadmetega seotud mõisteid', *Digitaaltehnika: Pooljuhtmäluuseadmetega seotud mõisteid - Definition of Terms: Principles of Semiconductor Memory Circuits and Devices*. https://www.tud.ttu.ee/im/Madis.Lehtla/WEB/Sissejuhatus_digitaaltehnikasse/Sonastikud/m%C3%A4luuseadmed.html (accessed Apr. 08, 2023).
- [7] D. A. Patterson and J. L. Hennessy, *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*, 5th Edition. Oxford, USA: Morgan Kaufmann, 2014.
- [8] 'Hard Drives Methods And Materials | Ismail-Beigi Research Group'. <https://volga.eng.yale.edu/teaching-resources/hard-drives/methods-and-materials> (accessed Apr. 09, 2023).
- [9] J. Kadis, 'Lecture7-Magnetic_recording.pdf'. 2014. Accessed: Apr. 09, 2023. [Online]. Available: https://ccrma.stanford.edu/~jay/subpages/Lectures/Lecture7-Magnetic_recording.pdf

- [10] ‘Methods and Materials: CDs and DVDs | Ismail-Beigi Research Group’. <https://volga.eng.yale.edu/teaching-resources/cds-and-dvds/methods-and-materials> (accessed Apr. 09, 2023).
- [11] E. Pavel, S. I. Jinga, B. S. Vasile, A. Dinescu, R. Trusca, and N. Tosa, ‘3D direct laser writing of Petabyte Optical Disk’, *Opt. Laser Technol.*, vol. 71, pp. 45–49, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.optlastec.2015.02.011.
- [12] Cmglee, *Comparison of various characteristics of a Compact Disc, and single-layer Digital Versatile Disc, High-Definition/Density Digital Versatile Disc and Blu-ray Disc. Dimensions indicated are track pitch (p), pit width (w) and minimum length (l), and laser spot size (\varnothing) and wavelength (λ).* Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_CD_DVD_HDDVD_BD.svg
- [13] ‘Flash Drives: methods and materials | Ismail-Beigi Research Group’. <https://volga.eng.yale.edu/teaching-resources/flash-drives/methods-and-materials> (accessed Apr. 09, 2023).
- [14] G. Vinuesa *et al.*, ‘Effect of Dielectric Thickness on Resistive Switching Polarity in TiN/Ti/HfO₂/Pt Stacks’, *Electronics*, vol. 11, no. 3, p. 479, Feb. 2022, doi: 10.3390/electronics11030479.
- [15] V. C. Nguyen and P. S. Lee, ‘Coexistence of Write Once Read Many Memory and Memristor in blend of Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate and Polyvinyl Alcohol’, *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 38816, Dec. 2016, doi: 10.1038/srep38816.
- [16] Q.-D. Ling, D.-J. Liaw, C. Zhu, D. S.-H. Chan, E.-T. Kang, and K.-G. Neoh, ‘Polymer electronic memories: Materials, devices and mechanisms’, *Prog. Polym. Sci.*, vol. 33, no. 10, pp. 917–978, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.08.001.
- [17] L. Chua, ‘Resistance switching memories are memristors’, *Appl. Phys. A*, vol. 102, no. 4, pp. 765–783, Mar. 2011, doi: 10.1007/s00339-011-6264-9.
- [18] S. Möller, C. Perlov, W. Jackson, C. Taussig, and S. R. Forrest, ‘A polymer/semiconductor write-once read-many-times memory’, *Nature*, vol. 426, no. 6963, pp. 166–169, Nov. 2003, doi: 10.1038/nature02070.

- [19] ‘Roadmap’, *Ultrium LTO*. <https://www.lto.org/roadmap/> (accessed Apr. 09, 2023).
- [20] ‘What is Multi-level Cell Technology? | KIOXIA’, キオクシア株式会社. <https://www.kioxia.com/en-jp/rd/technology/multi-level-cell.html> (accessed Apr. 13, 2023).
- [21] J. Wolfschlucker, ‘Digital MIPS - binary codes stored in molecularly imprinted polymers’, Johannes Kepler University Linz, 2016.
- [22] J. M. Lee *et al.*, ‘High-density information storage in an absolutely defined aperiodic sequence of monodisperse copolyester’, *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 56, Jan. 2020, doi: 10.1038/s41467-019-13952-2.
- [23] M. Ujimoto, W. Takashima, and K. Kaneto, ‘Photo induced memory devices using conducting polymer, poly(3-hexylthiophene) thin films’, *Thin Solid Films*, vol. 499, no. 1–2, pp. 313–317, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.tsf.2005.07.125.
- [24] A. Rinde, ‘Õppematerjal: Multimeedium, analoog vs digitaalne’. http://www.cs.tlu.ee/~rinde/mm_materjal/pdf/mm_analoog_digitaal.pdf (accessed Apr. 13, 2023).
- [25] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, Second Edition. San Diego, California: California Technical Publishing, 1999.
- [26] R. Temmer, ‘Electrochemistry and novel applications of chemically synthesized conductive polymer electrodes’, University of Tartu, 2014.
- [27] M. Gvozdenovic, B. Jugovic, J. Stevanovic, and B. Grgur, ‘Electrochemical synthesis of electroconducting polymers’, *Hem. Ind.*, vol. 68, no. 6, pp. 673–684, 2014, doi: 10.2298/HEMIND131122008G.
- [28] A. L. Pang, A. Arsad, and M. Ahmadipour, ‘Synthesis and factor affecting on the conductivity of polypyrrole: a short review’, *Polym. Adv. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 1428–1454, 2021, doi: 10.1002/pat.5201.

- [29] Y.-R. Luo, *Handbook of Bond Dissociation Energies in Organic Compounds*, 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2002. [Online]. Available: <https://doi-org.ezproxy.utlib.ut.ee/10.1201/9781420039863>
- [30] 'Vatt ja marli | BENU Veebiapteek'. <https://www.benu.ee:443/tooted/esmaabi-ja-isikukaitsevahendid/haavahooldus/vatt-ja-marli> (accessed May 03, 2023).
- [31] 'Pyrrole reagent grade, 98 109-97-7'. <http://www.sigmaaldrich.com/> (accessed May 02, 2023).
- [32] H. Arya, 'Computer Organization and Architecture _Module5_Lecture2_1.pdf'. https://www.marian.ac.in/public/images/uploads/EC206_CO_Module5_Lecture2_1.pdf (accessed May 03, 2023).
- [33] M. Laan, 'e-õpik : Optika põhikursus'. <https://opik.fyysika.ee/index.php/book/view/90/vertical#/section/39992> (accessed May 04, 2023).
- [34] Horison Information Strategies, 'Horison-Tape-New-Game-2021.pdf'. <https://asset.fujifilm.com/master/americas/files/2022-02/011ced6adae31b5400144cccc25083ce/Horison-Tape-New-Game-2021.pdf> (accessed May 04, 2023).

Lisad

I. Analüüsiks kasutatava programmi kood

```
import math
import numpy as np
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
matplotlib.use('tkAgg')

class Fiiber:

    def __str__(self):
        return f'Fiibri parameetrid: \n' \
            f'Lõigupikkus = {self.lõiguspikkus} mm\n' \
            f'Diameeter = {self.diameeter} mm\n' \
            f'Algne eritakistus = {self.eritakistusbaas}  $\Omega$  * m\n' \
            f'Maksimaalne eritakistus = {self.eritakistusmaksimum}  $\Omega$  * m\n' \
            f'Takistus astmeid = {self.takistusastmed}\n' \
            f'Kirjutamiseks kasutatav grupeering = {self.grupeering}\n' \
            f'Takistuse samm = {self.takistussamm}  $\Omega$ \n' \
            f'Lineaarne andmetihedus = {self.lineaarneandmetihedus()} bit/mm\n' \
            f'Pindalaline andmetihedus = {self.pindalalineandmetihedusRuuttoll()} \
            bit/toll2 = ' \
            f'{self.pindalalineandmetihedusmm2()} bit/mm2 \n' \
            #f'Kasutatavad takistus väärtused = {self.võimalikudtakistused}  $\Omega$ \n'

    def __init__(self, lõigupikkus, diameeter, eritakistusbaas, eritakistusmaksimum,
        takistusastmed):
        self.lõiguspikkus = lõigupikkus # mm
        self.diameeter = diameeter # mm
        self.eritakistusbaas = eritakistusbaas #  $\Omega$ *m
        self.takistusastmed = takistusastmed # arv
        self.eritakistusmaksimum = eritakistusmaksimum #  $\Omega$ *m

        self.takistussekvents = []

        self.ristlõikepindala = math.pi * (diameeter / 2) ** 2

        self.baastakistus = (eritakistusbaas * 1000 * lõigupikkus) / self.ristlõikepindala
        #Fiibri ühe lõigu algne takistus
        self.maksimumtakistus = (eritakistusmaksimum * 1000 * lõigupikkus) /
        self.ristlõikepindala
        #Fiibri ühe lõigu maksimaalne takistus

        self.grupeering = int(math.log(self.takistusastmed, 2))
        # Mitu bitti on võimalik fiibri ühele lõigule kirjutada
        self.takistussamm = (self.maksimumtakistus-self.baastakistus)/(self.takistusastmed-
1)

        #Kahe takistuse vaheline samm

        self.võimalikudtakistused = [] # Võimalike lõigu takistus väärtuste järjend
        self.permutatsioonid = []
        self.kodeering = {} #Sõnaraamat bitisekventsist vastavaks takistuseks
        self.dekodeering = {} #Sõnaraamat takistusest vastavaks bitisekventsiks

    def lähtestamine(self):
        for i in range(self.takistusastmed):
            self.võimalikudtakistused.append(self.baastakistus + i * self.takistussamm)
            self.permutatsioonid.append(self.grupeering)
        for i in range(
            len(self.permutatsioonid)):
            # Loob sõnaraamatu seades vastavusse bittide permutatsioonid ja võimalikud
            takistused
            self.kodeering[self.permutatsioonid[i]] = self.võimalikudtakistused[i]
            self.dekodeering[self.võimalikudtakistused[i]] = self.permutatsioonid[i]

    def permutatsioon(self, poolik, pikkus):
        if len(poolik) == pikkus:
            self.permutatsioonid.append(poolik)
        else:
            self.permutatsioon( poolik+ "0",pikkus)
```

```

        self.permutatsioon( poolik + "1", pikkus)
    return

def kirjutaandmed(self, bitisekvents):
    if len(self.võimalikudtakistused) == 0: #Lähtestab fiibri kui seda pole tehtud
        self.lähtestamine()

    self.tükeltatudsekvents = self.tükeldasekvents(bitisekvents)
    for tükk in self.tükeltatudsekvents:
        self.takistussekvents.append(self.kodeering[tükk])
    return f'Andmed edukalt kirjutatud, kasutatud fiibri pikkus =
{self.lõiguspikkus*len(self.takistussekvents)} mm'

def loeandmed(self):
    andmed = []
    loetudsekvents = ""
    for takistus in self.takistussekvents:
        andmed.append(self.dekodeering[takistus])
        loetudsekvents = loetudsekvents + self.dekodeering[takistus]
    return (loetudsekvents)

def түкeldasekvents(self, bitisekvents):
    # Tükeldab bitisekventsigruppeeringuga määratud pikkusega lõikudeks.
    # Kui bitisekventsipikkus ei ole grupeeringu pikkuse
    # kordne, lisab lõpu vajaliku arvu nullbitte.
    täidetud_bitisekvents = bitisekvents.ljust(math.ceil(len(bitisekvents) /
self.grupeering) * self.grupeering, '0')
    return [täidetud_bitisekvents[i:i + self.grupeering] for i in
        range(0, len(täidetud_bitisekvents), self.grupeering)]

def lineaarneandmetihedus(self): #Mitu biti on salvestatud 1 mm fiibri lõigule
    return self.grupeering/self.lõiguspikkus

def pindalalineandmetihedusmm2(self): #Mitu biti on salvestatud 1 mm2 suurusele pinnale
    return self.grupeering/(self.lõiguspikkus*self.diameeter)

def pindalalineandmetihedusRuuttoll(self): #Mitu biti on salvestatud 1 toll2 suurusele
pinnale
    konversioon = 0.00155 #1 mm2 = 0.00155 toll2
    return self.grupeering/(self.lõiguspikkus*self.diameeter*konversioon)

def lugemiskiirus(self, liikumiskiirus):
    #Arvutab lugemis kiiruse Mb/s. Tuleb sisestada fiibri liikumis kiirus ühikus m/s
    return self.lineaarneandmetihedus()*1000*liikumiskiirus/1000000

def pindalalineandmetihedusVSastmed(): #visualiseerib andmetiheduse sõltuvust
takistusastmete arvust
    andmetihedusedmm2 = []
    andmetihedusedtoll2 = []
    astmetearvud = []
    for i in range(1, 12):
        astmearv = 2 ** i
        fiiber = Fiiber(1, 1, 1, 10, astmearv)
        andmetihedusedtoll2.append(fiiber.pindalalineandmetihedusRuuttoll() / 1000)
        #andmetihedusedmm2.append(fiiber.pindalalineandmetihedusmm2())
        astmetearvud.append(astmearv)
    plt.close()
    plt.step(astmetearvud, andmetihedusedtoll2, linewidth = 2)
    #plt.title("Pindalalise andmetiheduse sõltuvus takistusastmete arvust ")
    plt.xlabel("Takistusastmete arv")
    plt.ylabel("Andmetihedus (kb/$toll^2$)")
    andmetihedusedtoll2.insert(0, 0)
    plt.yticks(andmetihedusedtoll2)
    plt.xticks([2,128,512,1024,2048])
    plt.grid()
    #plt.show()
    plt.savefig("pindalalineandmetihedusVSastmed.png", dpi=500)

def pindalalineandmetihedusVSpikkusJAdiameeter():
    #Visualiseerib andmetiheduse sõltuvust mäluraku pikkusest ja diameetrist
    n=100
    pikkus = np.linspace(1, 0.1, n)
    diameeter = np.linspace(1, 0.1, n)
    andmetihedused = np.zeros([n, n])

    for l in range(n):

```

```

        for d in range(n):
            fiiber = Fiiber(pikkus[l], diameeter[d], 0.001, 1, 64)
            andmetihedused[l][d] = fiiber.pindalalineandmetihedusRuuttoll()/1000
        pikkus, diameeter = np.meshgrid(pikkus, diameeter)
        plt.close()
        fig = plt.figure()
        ax = fig.add_subplot(projection='3d')

        ax.plot_surface(pikkus, diameeter, andmetihedused, cmap=plt.cm.coolwarm, linewidth=1,
            antialiased=False)
        #plt.title("Pindalalise andmetiheduse sõltuvus lõigupikkusest ja fiibri diameetrist")
        ax.set_xlabel("Memristori pikkus (mm)")
        ax.set_ylabel("Diameeter (mm)")
        ax.set_zlabel("Andmetihedus (kb/$toll^2$)")
        ax.view_init(15, 45, 0)
        #plt.show() #näitab joonist
        plt.savefig("pindalalineandmetihedusVSpikkusJAdiameeter.png", dpi=500) #salvestab
        joonise

def takistusedVSmeristorid(astmetearv):#Visualiseerib bitisekventsikirjutamisel tekivat
    takistus mustrit memristoritel
    fiiber = Fiiber(1, 1, 1, 10, astmetearv)
    fiiber.kirjutaandmed("100101001011010111100")
    memristorid = []
    memristoritearv = len(fiiber.takistussekvents)+ 1
    for i in range(memristoritearv):
        memristorid.append(i+1)
    sekventsikoopia = fiiber.takistussekvents.copy()
    sekventsikoopia.insert(0,fiiber.takistussekvents[0])
    plt.close()
    plt.step(memristorid, sekventsikoopia, linewidth = 2)
    #plt.title("Pindalalise andmetiheduse sõltuvus takistusastmete arvust ")

    for i in range(len(fiiber.takistussekvents)):
        plt.text(i+1.25, fiiber.takistussekvents[i]+80, fiiber.tükeltatudsekvents[i])

    plt.ylim(fiiber.võimalikudtakistused[0]*0.5,fiiber.võimalikudtakistused[-1]*1.1)
    plt.xlabel("Memristori järjenumber")
    plt.ylabel("Takistus ( $\Omega$ )")
    plt.xticks(memristorid[0:-1])
    plt.yticks(fiiber.võimalikudtakistused)
    plt.grid()
    #plt.show() # näitab joonist
    plt.savefig("Takistusprofiil"+ str(astmetearv)+".png",dpi =300) #salvestab joonise

pindalalineandmetihedusVSpikkusJAdiameeter()
pindalalineandmetihedusVSastmed()
takistusedVSmeristorid(2)
takistusedVSmeristorid(8)

memristoriPikkus = 0.0005 #mm
diameeter = 0.050 #mm
minEritakistus = 1 # $\Omega$ *m
maxEritakistus = 10 # $\Omega$ *m
takistusAstmeteArv = 8192

fiiber = Fiiber(memristoriPikkus, diameeter, minEritakistus, maxEritakistus,
    takistusAstmeteArv)
print(fiiber)
print("Lugemiskiirus = " + str(fiiber.lugemiskiirus(4))+ " Mb/s")

```

II. Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Vilhelm Valter,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Andmesalvestus polümeerses memristor fiibris“, mille juhendajad on Tarmo Tamm ja Helle Hein, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karl Vilhelm Valter

09.05.2023