

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogia instituut

Joonas Merisalu
**Sondijaama juhtimise tarkvara elektriliste mälude
uurimiseks**

Bakalaureusetöö arvutitehnika erialal (12 EAP)

Juhendaja:
Professor Jaan Aarik

Tartu 2016

Sisukord

Infoleht.....	1
1 Sissejuhatus.....	3
2 Töö taust.....	4
2.1 Arvutimälud	4
2.1.1 Dünaamiline muutmälu.....	5
2.1.2 Staatiline muutmälu	5
2.1.3 Väikmälu.....	5
2.1.4 Takistusmälu	6
2.2 Tehnoloogilised piirid ja mäluseadiste tulevik.....	10
2.3 Mäluelementide elektriline karakteriseerimine	11
3 Töö eesmärgid.....	13
3.1 Nõuded väljatöötatud tarkvarale	13
4 Eksperimendiseadmete kirjeldus	15
4.1 Sondijaam.....	15
4.2 Alalisvoolumõõtmised	17
4.3 LCR mõõtmised	18
5 Tarkvara kirjeldus	20
5.1 Suhtlus seadmetega ja IEEE-488 protokoll.....	22
6 Tulemused ja nende analüüs	24
6.1 Tarkvara rakendused mälukondensaatorite mahtuvuse mõõtmisel.....	24
6.2 Takistusmäluelementide formeerimine ja mõõtmine.....	25
6.3 Tarkvara ja mõõteaparatuuri rakendused GaAs jõudiodide voltamperkarakteristikate mõõtmisel.....	28

7	Kokkuvõte.....	30
8	Summary.....	31
9	Kasutatud kirjandus	32
10	Lisad.....	34
	Lihtritsents.....	42

Infoleht

Resüme

Käesolev töö kirjeldab mälulementide elektriliste mõõtmiste tegemiseks loodud tarkvara, mis on välja töötatud Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi kiletehnoloogia labori sondijaama CascadeMicrotech EPS150TRIAX kasutamiseks koos mõõteseadmetega Agilent E4980A ja Keithley 2636A. Töö heidab pilgu probleemidele, millega seisab silmitsi elektroonsete arvutimälude tööstus tänapäeval ja selgitab miks ja mida on tarvis probleemide lahendamiseks välja töötada, uurida ja mõõta. Töös on analüüsitud nõudeid sellisteks mõõtmisteks vajalikule tarkvarale ning kirjeldatud valminud tarkvara. Antud tarkvara arenduseks ja kontrollimiseks viidi läbi näidismõõtmised kiletehnoloogia laboris valmistatud mälulementidel. Tarkvara rakendati ka GaAs jõudiodide karakteriseerimisel.

Märksõnad: arvutimälu, takistusmälu, dünaamiline muutmälu, elektrilised mälu materjalid, sondijaam, arvutijuhitavad mõõtmised, elektrilised mõõtmised ja karakteriseerimine, kiletehnoloogia, täppismõõteseadmed, LCR-meeter, IEEE-488, LabView

Abstract

The thesis describes software developed for electrical characterization of modern memory materials at the Laboratory of Thin Film Technology of the Institute of Physics, University of Tartu. The software allows control of a LCR-meter Agilent E4980A and a source-meter Keithley 2636A in their applications with probestation CascadeMicrotech EPS150TRIAX. The thesis describes the working principles of modern electronic memories and appropriate combinations of electrical measurements needed for characterizing of those memories. The thesis also give a brief review of problems that modern computer memory industry and its development is facing. The software developed was tested in characterization of capacitor structures suitable for application in dynamic random access and resistive switching memories. The software was also used for characterization of GaAs high-power diodes.

Keywords: computer memories, DRAM, RRAM, resistive switching, probestation, computer guided measurements, electrical measurements and characterization, thin film technology, precision measurements, LCR-meter, IEEE-488, LabView

CERCS koodid: T120, T125, T171

1 Sissejuhatus

Tänapäeva teadustöös on arvutitel täita oluline roll. Arvutid võimaldavad töödelda ja analüüsida väga suuri andmehulki, mis kaasnevad mingite nähtuste teadusliku uurimisega. Suuremate andmemahude analüüsimine võimaldab saada täpsemaid ja usaldusväärsemaid tulemusi. Lisaks andmetöötlemisele on arvutitel oluline osa teaduslike ja tehnoloogiliste eksperimentide juhtimisel, kuna see võimaldab täpsemat ja kiiremat katseseadmete saamist ja kontrollimist. Paljud laboratoorsed protsessid vajavad täpset keskkonnatingimuste kontrolli, mida on tihtipeale võimatu ilma arvuti abita saavutada.

Üha suuremate andmemassidega opereerimine nõuab aga ka arvutustehnika, sh arvutimälude pidevat täiustamist. Vastavale teaduslikule uurimistööle pühendatakse maailmas praegu suurt tähelepanu, kusjuures tegeletakse nii tuntud mäluseadmete täiustamisega kui ka uute infosalvestusmeetodite otsingutega. Sellesuunalise uurimistöö on käsil ka Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi kiletehnoloogia laboris, kus üks olulisemaid uurimissuundi on mäluseadistes rakendatavate tahkisekilede aatomkihtsadestamise tehnoloogia arendamine. Selliste kilede uurimiseks on kiletehnoloogia laboris olnud kasutusel mitmed kaasaegsed seadmed, kuid alles hiljuti hangiti sondijaam, mis on äärmiselt vajalik mitmesuguste, sh ka mäluseadiste valmistamiseks sobivate, kilestruktuuride elektriliste omaduste karakteriseerimiseks. Seoses vastavate seadmete soetamisega tekkis vajadus mõõteseadmeid juhtiva tarkvara järele.

Mäluseadiste uurimiseks on vaja sageli läbi viia suurel hulgal lugemis- ja kirjutamisoperatsioone, et analüüsida nende vastupidavust. Arendustöös on aga sama oluline pidevalt täiendada ja muuta selliste seadiste valmistamiseks rakendatavat tehnoloogiat, millega omakorda kaasneb vajadus selliseid mõõtmisi pidevalt korrata. Seda laadi uurimistöö ei ole mõeldav ilma mõõteseadmete arvutijuhtimist kasutamata. Seepärast ongi käesoleva bakalaureusetöö töö ülesandeks mitmefunktsionaalse, kuid samas spetsiifiliste katseobjektide täppismõõtmisteks sobiva, ülitundlike mõõteseadmeid juhtiva tarkvara väljaarendamine ja katsetamine.

2 Töö taust

2.1 Arvutimälud

Arvutisüsteemide väga olulisteks komponentideks on mäluseadmed, mille mahutavus ruumiühiku kohta, kiirus, hind ja usaldusväärsus mõjutavad oluliselt arvutite funktsionaalsust, ökonoomsust ja töökindlust. Ajalooliselt on arvutimälusid jaotatud suures plaanis kaheks, püsi- ja hävimäludeks. Selline jaotus tuleneb asjaolust, et püsिमälud on võimelised infot pikaajaliselt säilitama ka ilma toitevooluta, kuid hävimäludes kustub informatsioon voolu katkemisel. Vajadus nende kahte erinevat liiki mälude järele on tingitud nende omadustest, peamiselt suhtluskiirusest, aga ka mõõtmetest. Hävimälud on alati olnud elektroonsed mälud ja suhtlus nendega on kiire. Seetõttu on arvuti muutmäludena kasutatud just neid.

Hävimälude suurus ja mahutavus sõltub elektroonikakomponentide mõõtmetest. Seetõttu on mikro- ja nanoelektronika kiire areng võimaldanud selliste mälude mahtu väga suurel määral tõsta ilma nende mõõtmeid suurendamata. Hävimälude eeliseks on olnud ka nende lihtne integreeritavus (mikro-) elektroonika seadmetesse. Tänapäevaste hävimälude peamine negatiivne külg on andmete mittesäilimine toitevoolu katkemisel. Kuna aga andmeid on tarvis säilitada ka toitevoolu puudumisel, on selleks kasutatud püsिमälusid. Suhtlus traditsiooniliste püsिमäludega on paraku aeglane. Näiteks selleks, et kõvakettale infot salvestada ja seda sealt lugeda on vaja juhtida mehhaaniliselt kirjutuspead õigele asukohale. See protsess on paratamatult aeglasem kui protsessori töö.

Õnneks on ka püsिमälud muutumas elektilisteks mäludeks. Üheks elektrilise püsिमälu näiteks on väikmälü. Elektriliste püsिमälude arendamisel on probleemiks olnud peamiselt materjal ja selle omaduste mõjutamise kiirus. Elektriline püsिमälu, mis oleks väikeste mõõtmetega ja kiiresti kirjutatav ning loetav, kaotaks vajaduse seniste hävimälude järele täielikult. Selline mälu oleks energiasäästlikum ja pakuks uusi võimalusi elektroonika arenguks. Seetõttu on elektriliste mälumaterjalide ja uute salvestus- ja lugemismeetodite uurimine väga aktuaalne.

2.1.1 Dünaamiline muutmälu

Muutmäludena on arvutisüsteemides kõige rohkem kasutatud dünaamilisi muutmälusid (i. k. *dynamic random access memory*, DRAM) [1]. DRAM mälorakk on nn 1T1C arhitektuuriga ehk koosneb transistorist ja kondensaatorist. Andmeid hoitakse rakus kondensaatori laenguna. Kui kondensaator on laetud, on raku loogiline väärtus 1, laengu puudumisel 0. Kuna kondensaatorid kaotavad ajapikku laengut, on vaja nende laetud seisundit pidevalt värskendada. DRAM võimaldab juhupöördumisi igale mäluelemendi aadressile [1]. DRAMi lihtne 1T1C arhitektuur on võimaldanud toota väga tihedalt pakendatud ja suhteliselt odavaid muutmälusid. DRAM raku minimaalne suurus on $6 F^2$, kus F on minimaalne elemendi mõõde integraalskeemides, mille arväärtus sõltub valitud tehnoloogiast [2]. DRAM on võrdlemisi pika elueaga võimaldades teha rohkem kui 3×10^{16} kirjutamise ja lugemise tsüklit [2]. DRAM mälorakust lugemine ja kirjutamine toimub aga võrdlemisi aeglaselt. Ühele lugemise või kirjutamise operatsioonile kulub rohkem kui 10 ns [2].

2.1.2 Staatiline muutmälu

Kuna protsessorid on võimelised opereerima tunduvalt kiiremini kui DRAM, on kasutusel staatilised muutmälud (SRAM), mida kasutatakse protsessorite vahemäludena [1]. SRAMi lugemise või kirjutamise operatsioon toimub 0,3 ns jooksul, kuid SRAMi mälorakk on seevastu võrdlemisi suur ($140 F^2$), sisaldades kuni 6-t transistori [2]. SRAM võimaldab oma eluea jooksul teha umbes sama palju kirjutamise ja lugemise tsükleid kui DRAM. Nii DRAM kui ka SRAM on hävimälud, mis tähendab, et toitevoolu katkemisel nende sisu hävineb.

2.1.3 Välmälu

Elektrilise salvetusega püsimaludest on enamlevinud välmälu [2]. Välmälu on elektriliselt kustutatava ja programmeeritava püsimalu ehk EEPROMi edasiarendus [2]. Välmälule on iseloomulik, et programmeerimine käib mäluplokkide kaupa [1]. Erinevalt klassikalisest EEPROMist, mille mälorakk koosneb kahest metall-oksiid pooljuht (MOP) transistorist, moodustab välmälu raku üks kahe paisuga MOP transistor. Enamlevinud NAND loogikavärati tüüpi mäloraku suurus on $5 F^2$, mis on väiksem kui DRAM rakk. Välmälu kirjutamise kiirus on ligikaudu 1 ms ja lugemise kiirus 0,1 ms [2]. Opereerimise kiirustest tingituna kasutatakse seda

vaid püsimaluna. NAND tüüpi välmälud võimaldavad 10^5 kirjutamise ja lugemise tsüklit [2]. Välmälu on säilmälu, ehk see säilitab oma väärtuse ka ilma vooluta olukorras [1]. Välmälud on DRAMide kõrval maailma turul ühed enim toodetud pooljuhtmälud [2].

2.1.4 Takistusmälu

2.1.4.1 Takistusmälu struktuur

Ehituselt sarnaneb takistusmälu (i.k. *resistive-switching random access memory*, *RRAM*) raku struktuur DRAMi kondensaatoriga. Lihtsaimal RRAMi rakul on kolmekihiline struktuur, kus kahe elektroodi vahel on dielektriku või pooljuhi kiht, mille juhtivust on võimalik muuta. Selliste struktuuride puhul on oluline, et kihid oleksid kõikides mälulementides ühesuguse faasikoostise ja täpselt kontrollitud paksusega [3]. Kõik kihid saadakse kiletehnoloogiliste meetoditega. Kõige täpsemini võimaldab sellist struktuuri valmistada aatomkihtsadestamise meetod [4].

Takistuslülitust on jälgitud mitut liiki materjalides, sealhulgas dielektrikutes, ferroelektrikutes, ferromagneetikutes ja pooljuhtides. Tavaliselt on olnud tegemist oksiididega. Enamikel juhtudel on takistuslülituse põhjuseks juhtivate filamentide teke elektroodide vahel, kuid on olnud ka takistuslülituse näiteid, kus filamente ei teki [2]. Dielektrilistest oksiididest on NiO, TiO₂, ZrO₂ ja HfO₂ sellised, mida RRAM struktuurides on kõige põhjalikumalt uuritud.

Takistuslülitust on enim uuritud metall-oksiid-metall-struktuurides. Takistuslülitus, ehk mälu raku takistuse muutus, toimub sellise kihtide paketi elektrilisel mõjutamisel, kas voolu või pingega eeldusel, et elektroodide ja nendevahelise suure takistusega kihi materjalid on sobivalt valitud. Uus takistuse väärtus säilib kuni järgmise mõjutuseni. Takistuslülitust oleks seetõttu võimalik rakendada nii püsi- kui ka muutmäludes. Takistuslülitusel eristatakse kahte mälu raku olekut: väikese takistusega ehk juhtivat olekut ja suure takistusega ehk mittejuhtivat olekut. Neid erinevaid seisundeid võiks vaadelda kui biti kõrget ja madalat olekut arvutitehnikas. Seetõttu oleks otstarbekas kasutada tähiseid R_{SET} ja R_{RESET} vastavalt väikese takistusega ja suure takistusega seisundi eristamiseks.

Selleks, et takistusmälu rakk oleks võimeline võistlema käibel olevate mälu tehnoloogiatega nagu välmälu, peab suhe R_{RESET}/R_{SET} olema suurem kui 10. Selleks, et takistusmälu säilitaks oma

oleku peab lugemispinge U_L olema väiksem, kui kirjutamispinge U_K . Arvestades elektroonika optimaalseid töötingimusi, ei tohiks lugemisel kulgev vool olla oluliselt väiksem kui $1 \mu\text{A}$ [1].

Eristatakse pinge samal polaarsusel toimuvat juhtiva seisundi sisse- ja väljalülitumist ehk unipolaarset (UP) lülitumist ja erinevatel polaarsustel toimuvat sisse- ja väljalülitumist ehk bipolaarset lülitumist [3]. Unipolaarsel lülitumisel toimub mäloraku kõrge ja madala seisundi saavutamine samal pinge polaarsusel, kuid erinevatel pinge väärtustel. Bipolaarse lülitumise korral on mäloraku oleku muutmiseks vaja rakendada eelmisel lülitusel kasutatud pingele vastasmärgilist pinget. Unipolaarse ehk mittepolaarse lülitumise korral on juhtimiseks kasutatavad voolud suuremad kui bipolaarse ehk polaarse lülitumise korral. Suuremad voolud kipuvad põhjustama mitte-taastuvaid läbilööke, mis sisuliselt tähendab raku hävimist. Sellest tingituna peab mittepolaarse lülitumise korral piirama toiteallika voolu nii juhtiva seisundi sisse- kui ka väljalülitamisel. Polaarse lülitumise korral tuleb piirata voolu juhtiva seisundi saavutamisel, ümberlülitamisel väikese juhtivusega seisundisse pole toiteallika voolu piiramine vajalik, kuna voolu piirab raku enda takistus [3] [5].

Polaarse lülitumise korral saab eristada mälorakkude omadusi vastavalt volt-amper-karakteristika liikumisele. Eristatakse nõo vastukaheksa- ja kaheksa-suunalisi mälorakke. Vastukaheksa-suunalise karakteristikaga mälorakul moodustuvad juhtivad filamendid ühtlaselt üle struktuuri. Seetõttu pole sellise raku korral oluline elektrodide suurus. Kaheksa-suunalise karakteristikaga mälorakus moodustuvad filamendid ühtlaselt ainult elektrodide vahelisel alal [3] [5].

RRAM mäloraku eelis muutmäluna oleks väike energiatarve. Erinevalt DRAM rakust ei pea raku seisundit pidevalt värskendama. Seega võib RRAMi kasutada nii muut- kui ka püsिमäluna. Muutmäluna kasutamisel on oluline saavutada väga suur lülitumiste arv. Püsिमäluna on suur kirjutamiste arv boonus, aga veelgi olulisem on raku võime säilitada oma olekut piisavalt kaua.

2.1.4.2 Takistuslülituse mehhanismid

Takistuslülituste kõik mehhanismid pole seni päris lõplikult välja selgitatud, aga siiski on jõutud mõningate üldiste põhimõtete ja mehhanismide osas ühisele arusaamisele. Alljärgnevalt on kirjeldatud kolme kõige levinumat lülitusmehhanismi. Kuigi ka nendega seonduv pole veel lõplikult selge, on üldist tunnustust leidnud seisukoht, et takistuslülitus on seotud elektrivälja põhjustatud struktuuri muutustega.

Elektrokeemiline metalliseerumine

Üldjuhul omab üks elektrood lülitumises suuremat rolli. Seda nimetatakse ka aktiivseks elektroodiks. Teine elektrood on üldjuhul inertsem. Toimuvat protsessi võib võrrelda elektrolüüsi anoodreaktsiooniga [2]. Anoodiks on aktiivne elektrood, millelt eralduvad positiivse laenguga metalli katioonid ja liiguvad katoodile. Kui katioonid saavad katoodilt elektroni, hakkavad nad kuhjuma ja moodustama filament. Moodustuv filament kasvab anoodi poole. Kui filament puudutab anoodi, siis on moodustunud juhtiv filament ja rakk on suure juhtivusega olekus (R_{SET}). Ümberlülitumiseks ehk raku viimiseks vähejuhtivasse olekusse (R_{RESET}) vahetatakse elektrivälja polaarsus elektrootide vahel. Polaarsuse muutumisel hakkavad filament moodustunud metalli katioonid liikuma tagasi aktiivsele elektrootile. On oluline märkida, et see protsess algab aktiivse elektrooti lähedal ja metalli katioonide tagasirände tulemusena katkeb filament aktiivse elektrooti juures. Allesjäänud filament säilib ja edaspidine lülitumine toimubki filamenti tiku ja aktiivse elektrooti vahel. Esimest filamenti tekitamist nimetatakse formeerimiseks. See protsess on vajalik, et edasised lülitumised saaksid toimuda. Kirjeldatud mehhanism on iseloomulik bipolaarsele takistuslülitusele [3].

Valentsi muutusel põhinev mälu-efekt

Oksiidides on kõige levinumad defektid hapniku vakantsid, mida peetakse peamisteks takistuslülituse põhjustajateks. Hapniku vakantside paigutus ja kontsentratsioon mõjutab oluliselt oksiidi takistust ja juhtivust. Seda seepärast, et hapniku vakantsid mõjutavad siirdemetalli oksiidis metalli katioonide valentsolekut. Kui metalli katioonid ühinevad hapniku vakantsidega, siis nende laengud neutraliseeruvad, vabaneb metalliga seotud elektron ja juhtivusvööndi elektronide arv suureneb [3]. Seega töötavad hapniku vakantsid doonoritena, mis võimaldavad vabade elektronide teket ja rännet. Takistusjuhtivates mälurakkudes on täheldatud hapniku vakantside grupeerumist ja filamendikujuliste moodustiste tekkimist elektrivälja toimel. Moodustunud filamentide piirkonnas on oksiidi takistus väiksem kui naaberpiirkonnades, kus filamente ei ole. See ei taga siiski veel alati kogu struktuuri takistuse olulist vähenemist, kuna oksiidi ja metalli elektronide väljumistöö on erinev ja nii saab elektrooti ja oksiidi piirpinnal moodustuda voolu piirav Schottky barjäär. Hapniku vakantside jaotuse muutus ja juhtivate filamentide teke mõjutavad aga ka Schottky barjääri omadusi muutes nii barjääri kõrgust ja laiust. Need muutused koos oksiidikihi takistuse vähenemisega filamentides põhjustavadki

takistuslülitusi struktuuris kui tervikus. Valentsi muutusel põhinevad takistuslülitused saavad toimuda ainult bipolaarse lülitumisega rakkudes [5].

Termokeemiline mälu-efekt

Termokeemiline lülitusmehhanism esineb rakkudes, kus dielektrikuks on siirdemetalli oksiid. See mehhanism on valdav unipolaarse lülitumisega rakkudes. Sarnaselt valentsi muutumise mehhanismiga põhineb ka termokeemiline mehhanism siirdemetalli kationide valentsoleku muutusel. Erinevuseks on see, et termokeemiline mehhanism on põhjustatud temperatuuri poolt. Siirdemetalli oksiidides, millel puuduvad stabiilsed faasid, põhjustab temperatuur redoksreaktsioone, mille tulemusel tekivad piirkonnad, kus kationide kontsentratsioon on keskmisest suurem ja kus moodustuvad metallilise juhtivusega filamendid [3].

Ühe või teise takistuslülitusmehhanismi domineerimist konkreetses elemendis on siiski küllaltki raske välja selgitada ja sageli ei saa välistada sedagi, et lülitumine võib toimida ka mitme mehhanismi koostoimel. Näiteks võivad aktiivselt elektroodilt eralduvad metalli katioonid moodustada oksiidi hapnikuga omakorda uusi oksiide. Seepärast valitakse aktiivse elektroodi materjal reeglina nii, et moodustunud oksiid oleks juhtiv.

2.1.4.3 Mäluraku formeerimine

Takistuslülituse korratavuse tagamiseks vajab RRAM mälurakk enamasti elektrilist eeltöötlust, mis viib mäluraku sobiva juhtivusega seisundisse. Seda protseduuri nimetatakse formeerimiseks. Formeerimise käigus muudetakse mäluraku algset struktuuri. Selleks pingestatakse rakk ja suurendatakse kas pinget või voolu tugevust, kuni toimub formeerumine. Üldjuhul on formeerimiseks vajalik pinge ja vool suuremad kui hiljem lülitamiseks tarvilik. Formeerimisel mäluraku juhtivus reeglina suureneb, mis näiteks DRAM kondensaatori korral oleks lubamatu, kuna muudab selle kasutuskõlbmatuks [4]. RRAM raku puhul on selline läbilööök vähemalt osaliselt pööratav. Formeerimisel on siiski oht objekti kahjustada, kui juhtivuse järsu suurenemise tulemusel ületab mälurakku läbiv vool lubatud piiri. Selle vältimiseks tuleb formeerimiseks kasutada pingesallikat, mille maksimaalset voolu on võimalik ette anda. Siiski on ka sellisel juhul oht, et voolu piiraja ei toimi piisavalt kiiresti, et vältida mäluraku pöördumatut

läbilööki. Seepärast on veelgi parem anda formeerimisel ette mälorakku läbiv vool. Sel juhul on vool kindlalt piiritletud nii, et rakk ei hävineks [2].

Mõnede materjalide korral toimub formeerumine lülitamisega samadel pingetel ja vooludel. Selliseid mälorakke nimetatakse ka formeerimisvabadeks ja nende kasutamine pakub mälotööstusele kõige suuremat huvi. Vastavalt mäloraku omadustele ja formeerimise viisile on võimalik viia rakk formeerimise käigus kas suure- või väikese juhtivusega seisundisse. Formeerimisel luuakse esmased juhtivad filamendid, mis on tarvilikud järgnevateks lülitumisteks. Formeerumise mehhanism on erinevate takistusmälotüüpide puhul erinev. Näiteks bipolaarsele lülitumisele on iseloomulik filamentide formeerumine tänu ioonide ja hapniku vakantside liikumisele elektrivälja toimel. Samas unipolaarse lülitumise korral toimub filamentide formeerumine enamasti termilise mõjutuse tõttu [2] [3].

2.2 Tehnoloogilised piirid ja mäloseadiste tulevik

Elektroonikatööstuse esindajad on rahvusvahelisel tasemel kokku leppinud, et seoses integraalskeemide elementide mõõtmete järkjärgulise vähendamisega hakatakse tulevikus vähendada loogika nivood 5 voldist järk järgult madalamale (3,3 V; 1,1 V; 0,5 V). Nivool 0,5 V ei tööta tänapäeva tehnoloogiatega valmistatud välmälud enam usaldusväärselt. Kuna välmälu on võrdlemisi aeglane ja lühikese elueaga võrreldes DRAM mäluuga, ei nähta välmälu perspektiivika püsimaluna. Samas DRAM mälorakkude suurust on vähendatud alates 70datest, kusjuures praegu on raku lineaarmõõtmed alla 100 nm ja edaspidine suuruse vähendamine võib osutuda problemaatiliseks [2].

Seetõttu tegeletakse intensiivselt uute tehnoloogiate otsimise ja arendamisega. Üks sellistest uutest tehnoloogiatest RRAM. RRAM mäloraku suurus on $4 F^2$, mis on väiksem kui DRAM rakk [2]. Takistusmäloraku lugemise ja kirjutamise kestuseks on praegustes lahendustes 5 ns, mis on vähem kui DRAM raku puhul [2]. Lugemise ja kirjutamiskordade arv on RRAM rakul suurem kui välmälul ulatudes kuni 10^{10} tsüklini [2]. Sellest tulenevalt on RRAM rakendatav nii muutkui ka püsimaludes. Kuna ligi 40% arvutite energiatarbest moodustavad ketta- ja DRAM-seadmed, siis nende asendamisel RRAM säilmälu oleks võimalik saavutada väga suur energia kokkuhoid [2]. Seepärast tegeletakse maailmas praegu väga intensiivselt RRAM mälude

arendamisega. Selles uurimistöös osaleb ka Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi kiletehnoloogia labor, kus käesolev bakalaureusetöö on tehtud.

2.3 Mäluelementide elektriline karakteriseerimine

Mäluelementide elektriliste omaduste karakteriseerimine eeldab reeglina nende juhtivuse, mahtuvuse, lülituspingete ning –voolude jt parameetrite mõõtmisi. Sageli on selliseid mõõtmisi vaja läbi viia erinevatel temperatuuridel. Lisaks on oluline registreerida mälurakus aja jooksul toimuvad muutused. Seda nii selleks, et selgitada välja, kui kaua suudab üks mälurakk infot säilitada kui ka selleks, et prognoosida mäluseadiste maksimaalset eluiga või salvestuskordade arvu. Mäluseadiste väljatöötamise faasis on sellise uurimistöo üks oluline eesmärk saada tagasisidet selleks, et täiustada ja muuta sobivas suunas nende valmistamiseks kasutatavaid tehnoloogiaid.

DRAM kondensaatorite karakteriseerimisel on üks tähtsamaid etappe lekkevoolude ning nende temperatuurisõltuvuse uuringud. Kondensaatorite puhul on oluline määrata ka maksimaalne lubatud pinge. Need mõõtmised viiakse reeglina alalisvoolu režiimis. DRAMide mälukondensaatoreid uuritakse tänapäeval tööpingetel alla 1 V ja ühe mäluraku tüüpilised lekkevoolud võivad olla alla 0,1 fA [4]. Väljatöötamise faasis kasutatakse siiski suurema pindalaga mäluelemente, mille tüüpilised lekkevoolud ei ole alla 1 pA. Selliste mäluelementide lekkevoolude karakteriseerimiseks mõõdetakse tavaliselt volt-amper- (I-V-) karakteristikad.

Vahelduvvoolu mõõtmistel uuritakse mälukondensaatorite mahtuvusi ja dielektrikute dielektrilist läbitavust. Mahtuvuste puhul uuritakse sõltuvust mõõtesignaali sagedusest, pingest ja ka temperatuurist. DRAM tüüpi mälukondensaatorite mahtuvus peab olema suurem kui 25 fF raku kohta [4]. Kondensaatorstruktuuride väljatöötamise staadiumis uuritavate kondensaatorite mahtuvused jäävad aga reeglina vahemikku 100 pf – 10 nF.

RRAM mäluelemendid on oma ehituselt DRAM mälurakkudega väga sarnased. RRAM mälurakkude suurim erinevus elektrilise karakteriseerimise seisukohalt see, et peale formeerimist on nende tüüpilised voolud mitmeid suurusjärke suuremad DRAMi mälurakkude samadel pingetel mõõdetud lekkevooludest.

Kõnealused mälu elemendid, ka väljatöötamise staadiumis kasutatavad, on väga väikesed. Nende tüüpilised elektroodide pindalad on 0.05 mm^2 . Seepärast on nende mõõtmise läbiviimiseks tarvis sondijaama, mis lubaks teraviksondide abil saada usaldusväärset kontakti nii väikese pindalaga elektroodidega. Kaasaegsed sondijaamad võimaldavad mõõtmisteks kasutada kuni $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ teravikuraadiusega sonde.

3 Töö eesmärgid

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua programm, mis lihtsustaks sondijaamaga seotud mõõtmiste tegemist ja viia läbi näidismõõtmised takistuslikel mäluelementidel, mälukondensaatoritel ja GaAs jõudiodidel. Sondijaama mõõtetarkvara peab olema arendatud vastavalt Füüsika Instituudi kiletehnoloogia labori vajadustele tahkistruktuuride elektriliste omaduste uurimisel.

Kuigi sondijaama mõõteparaadid võimaldavad mõõtmisi läbi viia ka käsitsi seadmete juhtpaneelidelt, on selline mõõtmisviis aeganõudev ja vajab teadmisi, kuidas seadet konfigurereida. Lisaks on käsitsimõõtmistel keeruline andmete salvestamine. Tarkvara loomise eesmärk oli muuta mõõtmiste tegemine mugavamaks, kasutades selleks ühtset keskkonda ja talletada andmeid otse arvutisse ühtsel kokkulepitud formaadil.

Antud töö teiseks eesmärgiks oli viia loodud tarkvara abil läbi näidismõõtmised mõningatel tüüpilisematel ja päevakorralisematel struktuuridel ning analüüsida mõõteprotseduuri õnnestumist ja saadud mõõtetulemusi.

Töö kolmandaks eesmärgiks oli luua tutvustav õppe- ja juhendmaterjal sondijaama kasutajale.

3.1 Nõuded väljatöötatud tarkvarale

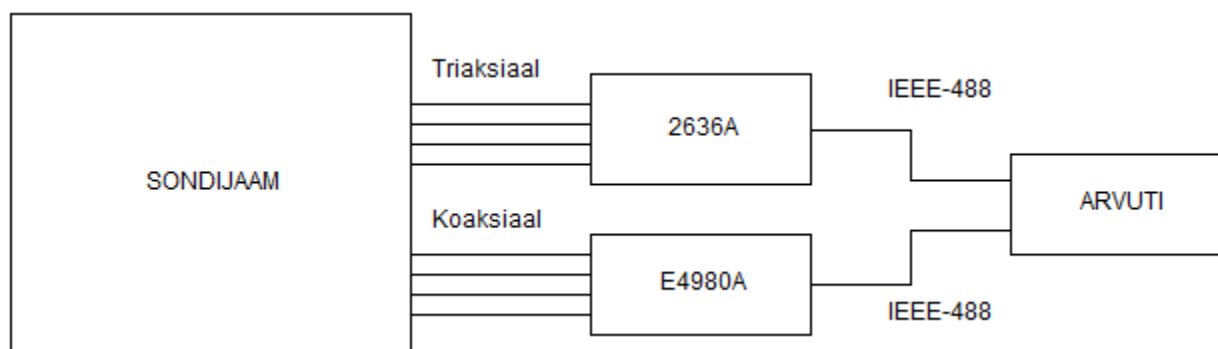
Vastavalt töö eesmärkidele oli sondijaama juhtimise tarkvarale esitatud järgnevad nõuded:

1. Võimaldab juhtida mõõteseadmeid Keithley 2636Ad ja Agilent E4980A.
2. Lubab kasutada seadmeid eraldi või vaheldumisi.
3. Võimaldab seadistada mõõteparaate graafiliselt kasutajaliideselt.
4. Omab inglisekeelset programmi kasutajaliidest ja alamprogrammide dokumentatsiooni.
5. Kasutab samasuguseid mõõteseadmete seadistatavate parameetrite nimetusi nagu seadmete juhtpaneelid ja kasutusjuhendid.
6. Võimaldab viia läbi sarimõõtmisi, andes ette muudetava parameetri väärtuste hulga või vahemiku, mõlemal mõõteseadel.

7. Võimaldab käivitada automaatselt üksteise järel mitut sarimõõtmist. Vastavate mõõtmistsüklike vahelised viivised on seadistatavad.
8. Kuvab reaajas mõõtetulemuse ja kujutab mõõtetulemused graafikul.
9. Võimaldab vahetada graafiku telgi ja kuvada mõõtetulemuste logaritmilisi väärtusi.
10. Võimaldab kasutajal salvestada mõõtetulemused kokkulepitud struktuuriga TSV faili.
11. Tekitab mõõtetulemuste faili, mis sisaldab piisaval hulgal seadistatud parameetrite väärtusi ja informatsiooni mõõteparaadi kohta, nii et nende andmete põhjal saab mõõtmisprotseduuri korrata.

4 Eksperimendiseadmete kirjeldus

Käesolevas töös kasutatud mõõtekompleksi plokkskeem on esitatud joonisel 1. Koos sondijaamaga kasutatakse selles kompleksis kahte mõõteaparaati, vahelduvvoolumõõtmisteks mõeldud LCR-meetrit Agilent E4980A ja alalisvoolu mõõteriista Keithley 2636A. Seade Agilent E4980A ühendatakse sondijaamaga koaksiaalkaablite abil, seade Keithley 2636A aga triaksiaalkaablitega, et oleks tagatud mõõteahela suurem häirekindlus. Neid mõõteaparaate juhitakse arvutiga IEEE-488 protokoll järgi.



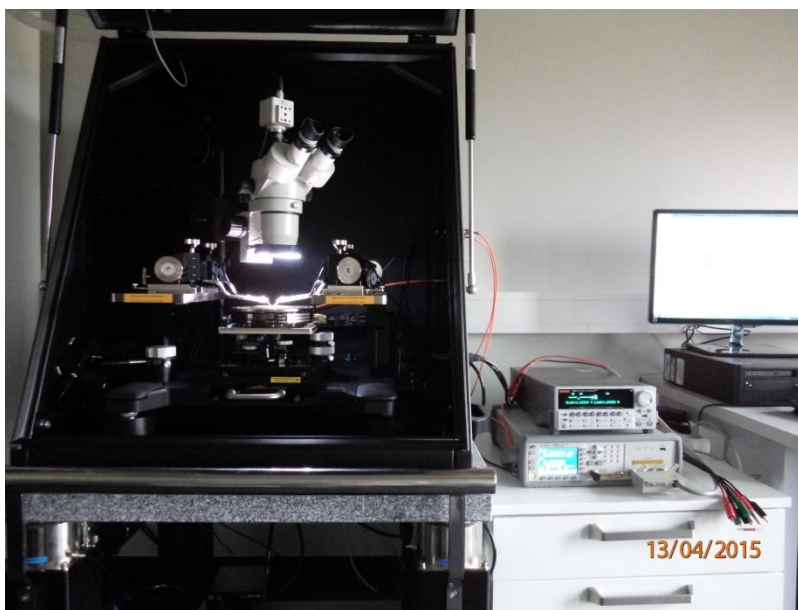
Joonis 1. Eksperimendikompleksi plokkskeem, millel on näidatud sondijaama ja seadmete omavahelised ühendused.

4.1 Sondijaam

Sondijaamad on mõeldud väikeste mõõtmistega elemente sisaldavate tahkisstruktuuride elektriliste omaduste uurimiseks. Selleks, et mõista ainult materjali struktuurist ja omadustest tingitud käitumist on ülimalt tähtis kõrvaldada mittekontrollitavad välised mõjud. Lisaks on tihti vaja uurida materjalide käitumist väga väikestel vooludel ja pingetel, kus välismõjud võivad täielikult rikkuda mõõtmistulemused.

Käesolevas töös kasutati sondijaama CascadeMicrotech EPS150TRIAX (joonis 2), mis on kõrgtäpsusega manuaalne sondijaam madalpinge- ja nõrkvoolumõõtmisteks. Sondijaamas on loodud soodne keskkond elektrilisteks mõõtmisteks ja ühtlasi kaitseb see mõõdetavat objekti välismõjutuste eest. Elektro-magnetlainetena leviva müra, sealhulgas ka valguse eest kaitseb objekti sondijaama metallist korpus. Objekti kaitsmiseks akustilise müra ja vibratsiooni eest,

asub kogu sondijaama korpus massiivsel graniitplaadil, mis omakorda toetub õhkpatjadele. Õhkpatjade rõhk on täpselt kontrollitud suruõhu sisend- ja väljundventiilidega.



Joonis 2. Kilelabori sondijaam, mõõteaparaadid Keithley 2636A, Agilent 4980A ning tööjaama arvuti.

Lisaks välisele metallkorpusele on sondijaamas kolme telge pidi liigutatav alusplaat, neli sondi positsioneerijat ja kaameraga mikroskoop. Sonde ja alusplaati saab ühendada mõõteseadmetega läbi triaktsiaalkaablite [6].

Alusplaadi temperatuur on reguleeritav vahemikus 20 - 300 °C ja stabiliseeritav $\pm 0,1$ °C täpsusega. Kontrollitav küttesüsteem on väga madala müratasemega. Alusplaadi läbimõõt on 150 mm [6].

Sondide positsioneerijad võimaldavad sonde liigutada kolmes ristuvast suunas 1 μm täpsusega [6]. Tüüpiliste kasutusel olevate sondide otsaraadiused jäävad nõrkvoolu mõõtmistel vahemikku 0,5 - 20 μm .

Sondijaama mikroskoop võimaldab jälgida sondide paigutamist objektile. Mikroskoobi suurendust saab muuta vahemikus 15–100. Mikroskoop on varustatud reguleeritava intensiivsusega LED valgustiga [6].

4.2 Alalisvoolumõõtmised

Alalisvoolumõõtmisteks kasutatakse seadet Keithley 2636A. See seade töötab samaaegselt toiteallika ja mõõteaparaadina. Toiteallikas võimaldab ette anda voolu või pinget ning mõõteriist lubab samal ajal mõõta nii voolu kui ka pinget [7]. Seega pakub see seade mitmesuguseid võimalusi mõõtmiste läbiviimiseks.

Keithley 2636A võimaldab lisaks pingele ja voolu mõõtmistele mõõta ka takistust ja võimsust. Signaali müra summutamiseks on võimalik rakendada erinevaid filtreid. Seadme Keithley 2636A pinges allikas annab välja pinget, mida on võimalik muuta vahemikus 1 μV kuni 200V. Voolu stabiliseerimise režiimis annab toiteallikas välja voolu, mida saab varieerida vahemikus 20 fA kuni 1,515 A. Mõõteseade võimaldab mõõta pingeid 1 μV kuni 204 V ja voolusid 1 fA kuni 1,53 A [8]. Mõõteseadme funktsionaalsusi on võimalik omavahel kombineerida ja samaaegselt rakendada. Näiteks antakse ette pingele ja mõõdetakse objektis kulgevat voolu või antakse ette vool ja mõõdetakse pingelangu objektis. Väga oluline on seejuures sarimõõtmise režiim. Sarimõõtmiste tsükli puhul seadistatakse seadme parameetrid ja antakse seadmele ette muudetavate toiteallikaparameetrite punktide hulk. Seade võimaldab täpselt kontrollida toiteallika järjestikuste väärtuste rakendumise ja mõõtmiste vahelisi viiviseid. Täpne ajaline kontroll võimaldab saavutada optimaalse mõõtmiskiiruse ja objekti stabiliseerumisaega vahetult [7].

Seade Keithley 2636A on programmeeritav ja arvutijuhitav, mis lisab veelgi erinevaid võimalusi mõõtmisteks [7]. Arvutiga suhtleb seade läbi IEEE-488 liidese. Sisesehitatud mäluühenduses on võimalik hoida kuni 140 000 mõõteväärtust. Sarimõõtmistel võimaldab seade genereerida kahe etteantud väärtuse vahelisi lineaarselt või logaritmiliselt muutuvaid parameetrihulkasid. Mõõteprotseduure on võimalik programmeerida nõnda, et kasutatakse sisemisi ajastus- ja käivituse mehhanisme, mis võimaldavad suure täpsusega sünkroniseerida protseduure [8].

Lisaks sellele, et seade Keithley 2636A täidab mitut ülesannet, on tagatud ka maksimaalne võimalik isoleeritus nii seadme erinevate osade vahel kui ka välismõjudest. Seadmel 2636A on kaks üksteisest sõltumatut kanalit. Mõlemad kanalid saavad olla korraga nii allikaks kui ka mõõteaparaadiks. Mõõteaparaadil on pingele mõõtmise režiimis väga kõrge sisendtakistus, mis ulatub 100 T Ω -ni. Seade on väga tundlik, võimaldades mõõta femtoampri suurusjärgus olevaid

voolusid [7]. Mõõtemääramatus sõltub mõõtepiirkondadest ning seadistuse valikust ja selle võib arvutada kasutades on toodud seadme kasutusjuhendites olevaid tabeleid [8].

Madalpinge- ja nõrkvoolumõõtmiste puhul on ülimalt tähtis likvideerida mõõtmisi segavad välismõjud. Mõõteahelates ei tohi esineda uitvoole ega tundmatuid parasiitmahtuvusi või takistusi. Neid mõjusid aitavad vähendada triaksiaalkaablid, millega ühendatakse seade Keithley 2636A sondijaama sondide külge. Triaksiaalkaableid kasutatakse täppismõõtmistel. Triaksiaalkaabli südamikuks on signaali juhtiv traat, mida ümbritsevad koaksiaalselt kaks varjestavat kihti. Südamiku ja sisemise varjestuse ja kahe varjestava kihi vahel on dielektrikust isolatsioon [9]. Topeltvarjestus ja hoolikalt valitud isolatsioonimaterjalid vähendavad väliste häirete sattumist signaaliahelasse. Kaabli disain ja sobivate dielektrikute kasutamine võimaldab vähendada kaabli vibratsioonil või väändel tekkivat piesoelektrilist ja triboelektrilist müra [7].

Kuna seadme Keithley 2636A parameetrid on väga sobivad madalpinge- ja nõrkvoolumõõtmisteks, on võimalik seadet rakendada ka pooljuhtobjektide voltamperkarakteristikate mõõtmistel.

4.3 LCR mõõtmised

Mahtuvuse, induktiivsuse ja takistuse mõõtmiseks kasutatakse koos sondijaamaga LCR mõõteaparaati Agilent E4980A, mis on laialt kasutatav aparaat tööstuslikuks elektroonikakomponentide kvaliteedi kontrolliks ja laboratoorseks uurimistööks.. LCR mõõteaparaadil on sisemine alalispingeallikas, mida saab samuti mõõtmistel rakendada. Seade võimaldab mõõta induktiivsust ja mahtuvust ning ka jadamisi või paralleelselt rakenduvat ekvivalentset aktiivtakistust. Mõõdetav objekt ühendatakse vahelduvvoolu ahelasse ja mõõdetakse objektis kulgevat voolu ja sellest tingitud pingelangu. LCR mõõteseadme mõõtesagedus on seadistatav vahemikus 20 Hz kuni 2 MHz. Vastavalt voolu ja pinge suhtele arvutab mõõteaparaat impedantsi suuruse. Täiendavalt mõõdetakse ka pinge ja voolu vaheline faasinurk, mis võimaldab koos impedantsi väärtusega arvutada mõõteobjekti ekvivalentse mahtuvuse (või induktiivsuse) ja aktiivjuhtivuse (või takistuse). Enne mõõtmisi tuleb mõõteaparaat seadistada kas jada- või paralleelmõõtemudeli kasutamisele. Ühe või teise mõõtemudeli valik sõltub nii mõõdetava objekti parameetritest kui ka mõõtesagedusest [10].

Mõõtesignaali pinge efektiivväärtus on seadistatav vahemikus 0,1 mV kuni 20 V. Alternatiivina saab ette anda ka mõõtesignaali voolu efektiivväärtuse, mis on valitav vahemikus 50 μ A kuni 200 mA. Lisaks on võimalik seadistada alalispinge nihe vahemikus -40 V kuni 40 V. Veel võimaldab seade läbi viia mõningaid alalisvoolumõõtmisi kasutades selleks sisemist alalispingeallikat ja sisseehitatud alalisvoolu ja $-$ pinge mõõteriistu [11].

LCR mõõteseade ühendatakse sondijaama sondide külge koaksiaalkaablitega, millel on erinevalt triaksiaalkaabitest ainult üks varjestav kiht. Sondijaama triaksiaalkaablitega ühendatakse LCR mõõteseadme koaksiaalkaablid vastavaid sobitusliideseid kasutades.

E4980A mõõteaparaadi täpsus sõltub mõõtepiirkonnast ning mõõtmise seadistusest ja on arvutatav kasutades mõõteseadme juhendis toodud tabelleid [11].

Mõõteaparaadi sarimõõtmiste režiim võimaldab sisestada kuni 201 punkti kas signaali taseme, sageduse või nihkepinge väärtusi [11]. Seade Agilent E4980A on arvutijuhitav. Arvuti suhtleb seadmega IEEE- 488 protokolliga kasutades.

5 Tarkvara kirjeldus

Programmi eesmärk on lihtsustada mõõteprotseduuride läbiviimist ja andmete kogumist. See on mõõteaparatuurispetsiifiline ja võimaldab juhtida seadmeid Keithley 2636A ning Agilent E4980A ja suhelda nendega.

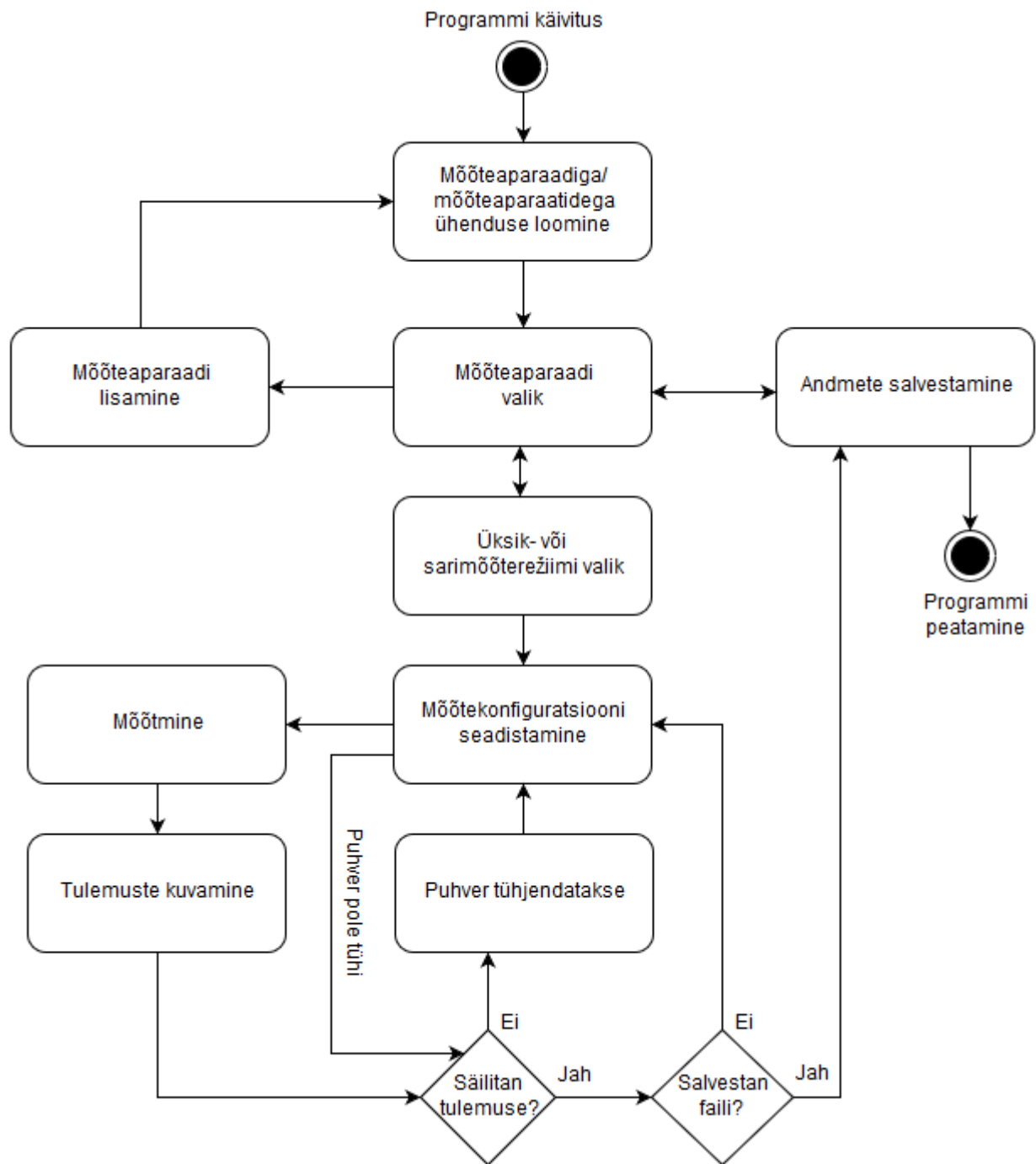
Sondijaama mõõteaparaatide kontrollprogramm on programmeeritud LabView keskkonnas. LabView programmeerimiskeskkonna valiku põhjuseks on:

- võimalus lihtsalt luua kasutajaliides;
- võimalus lihtsalt visualiseerida andmeid;
- kasutada laia valikut seadmete draivereid, mida LabView pakub;
- võimalus suhteliselt lihtsalt luua keerukaid juhtimis- ja suhtlusstruktuure;
- võimalus kasutada paralleelset koodi ja automaatset tuumade jaotust.

Programm ei sisalda kõiki mõõteaparaatide funktsionaalsusi, kuid realiseerib siiski suurema osa võimalustest. Realiseeritud funktsionaalsused on programmeeritud vastavalt kiletehnoloogia labori vajadustele ja disainitud võimalikult paindlikult. Peamised programmi funktsionaalsused on järgmised.

1. Üksikmõõtmine mõõteaparaadi kõigis võimalikes töörežiimides.
2. Sarimõõtmised mõõteaparaadi enamikes töörežiimides.
3. Automaatselt käivituvad järjestikused sarimõõtmised.
4. Mõõtetulemuste visualiseerimine.
5. Andmete valikuline kogumine salvestuspuhvrisse.
6. Võimalus lisada mõõteprotseduuri kohta kommentaar.
7. Mõõtekonfiguratsiooni, kuupäeva ja kellaaja ning mõõtetulemuste salvestamine kokkulepitud struktuuril TSV faili.

Sondijaama juhtprogrammi struktuuri selgitab olekudiagramm, mis on esitatud joonisel 3.



Joonis 3. Tarvara struktuur.

Sondijaama juhtprogrammi täpsemad võimalused ja graafilise kasutajaliidese kirjeldus on eraldi lahti seletatud programmi kasutajajuhendis, mis on käesoleva töö lisas 1.

Programmi loomisel on arvestatud olukorraga, kus seadmeid kasutatakse kordamööda. Sellise olukorra praktiliseks realiseerimiseks on vaja seadmete füüsiliste ühenduste ümbertõstmine

sondijaama kontaktidel. Algpäraselt oli laboril plaanis soetada selleks ettenähtud multiplekser, kuid sellest esialgu loobuti, kuna selle kasutamine võib vähendada mõõtmiste täpsust. Seetõttu programmi võime kontrollida mõlemat aparati kordamööda pole praegu oluline, kuid võimaldab tulevikus seda siiki teha. Kasutaja saab programmi käivitamisel valida, kas ühendada programmiga vaid üks või mõlemad mõõteaparaadid. See võimaldab programmi kasutada ka ühe seadme puudumisel.

Programm suhtleb kasutajaga inglise keeles. Keelevalik põhineb kahel kaalutlusel.

1. Seadmete parameetrite nimed säilitavad algkuju ja nende sisu on kontrollitav seadme kasutusjuhendist.
2. Programmi kasutamisega saab hakkama ka eesti keelt mitte kõnelev kasutaja.

Käesoleva töö jooksul valminud tarkvara pole lõplik. Selleks, et programm oleks võimalikult universaalne, on oluline selle arendamisel teha koostööd kasutajatega. Selline arendamine on paratamatult aeganõudev ja nõuab pidevalt pisimuudatuste tegemist. Lisaks põhiprogrammi edasiarendamisele on tulevikus plaanis luua täiendavat tarkvara. Lisanduda võiks programm, mis võimaldaks mõõtefaile ka hiljem graafiliselt visualiseerida.

5.1 Suhtlus seadmetega ja IEEE-488 protokoll

Mõlema aparadiga suheldakse läbi IEEE-488 paralleelühenduse. Suhtlemise loomine käib LabViews olemasolevate draiverite abil. Mõlemal mõõteaparaadil on oma käsustik, mis on tootja poolt määratud. Agilenti ja Keithley olemasolevad LabView draiverid realiseerivad suurema osa seadmete käsustikust. Seega on suhtlemine vastavate seadmetega suhteliselt lihtne, kasutades selleks vastavaid alamprogramme. Näidissuhtlus seadmega on kirjeldatud lisa 2.

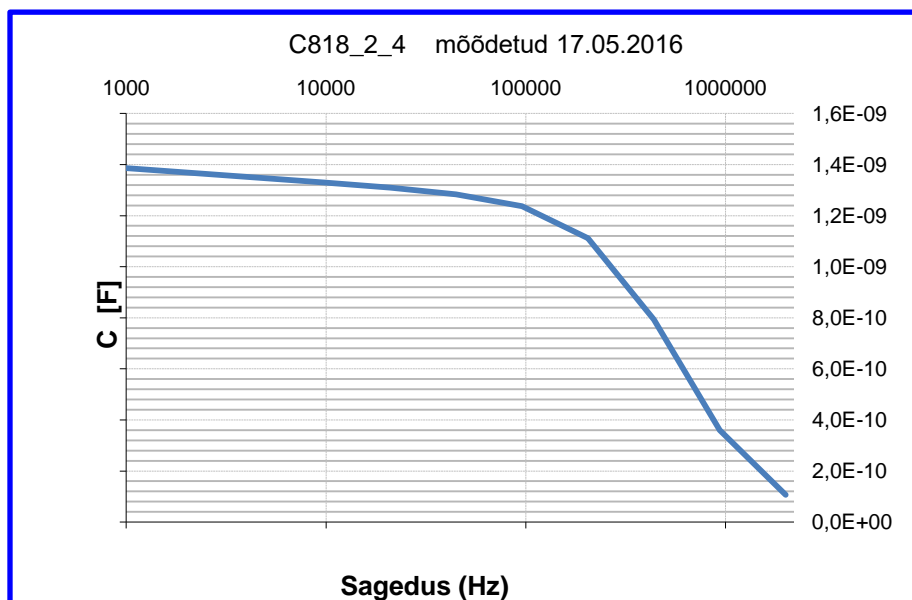
IEEE-488 on kommunikatsiooniliides, mida kasutatakse peamiselt mõõteseadmete omavaheliseks ja arvutiga suhtlemiseks. IEEE-488 liidest nimetatakse ka GPIBks (*General Purpose Interface Bus*). Tegemist on digitaalse paralleelliideselega, mis võimaldab saata andmeid 8 biti kaupa. GPIB võimaldab omavahel ühendada kuni 15 seadet. Ühel seadmel saab korruga olla üks roll kolmest võimalikust: kontrolleri, kuulaja, saatja. Töötavas süsteemis peab olema üks kontrolleri, mis määrab teised seadmed vastavalt vajadusele kas kuulajateks või saatjateks [12].

Standardi kohaselt moodustab GPIB liidese 24 ühendusliini. 8 liini on andmete edastamiseks. 5 kontrolliini on seadmete adresseerimiseks. Suhtlus parameetrite seadistamiseks on 3 kätlemisliini. Ülejäänud 8 liini on kasutusel maaühenduseks. Kommunikatsiooniliidese maksimaalne andmevahetuskiirus on 1 MB/s, kuid reaalse suhtluskiiruse määrab süsteemi kõige aeglasem seade. Uuema standardi HS-488 järgi on maksimaalne kiirus 8 MB/s. Seadmetevahelise ühenduskaabli soovituslik maksimaalne pikkus on 2 m ja kaabli kogupikkus ei tohi ületada 20 m [12].

6 Tulemused ja nende analüüs

6.1 Tarkvara rakendused mälukondensaatorite mahtuvuse mõõtmisel

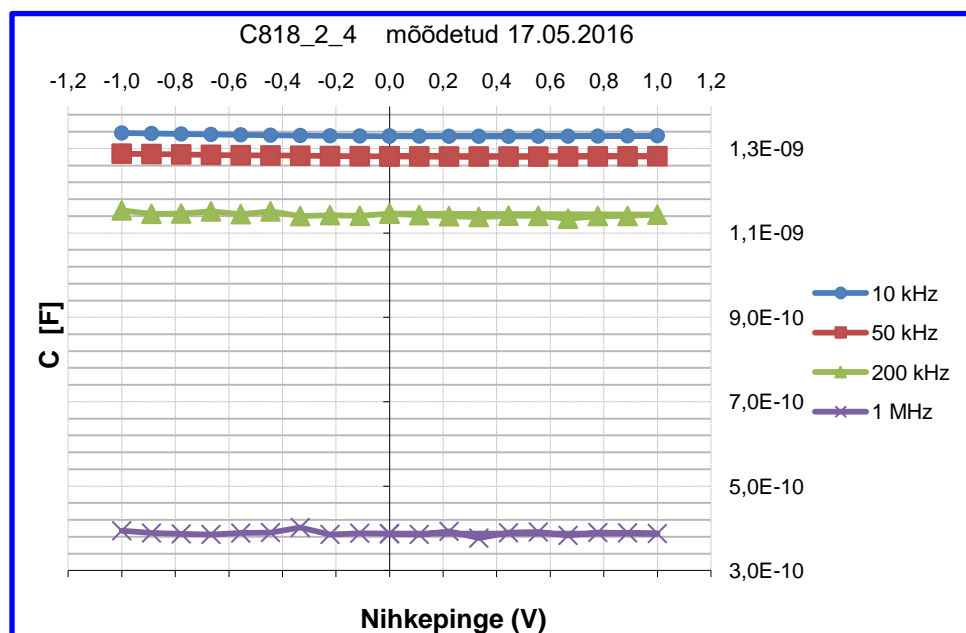
Mõõtmisteks valitud mälukondensaator oli valmistatud oksüdeeritud ränialusele, millele oli kõigepealt sadestatud ruteeniumdioksiidist (RuO_2) alumine elektrood. Dielektrikuks oli aatomkihtsadestamise meetodil valmistatud hafniumtitaanoksiidi kile, mille koostis on kirjeldatav keemilise valemiga $\text{Hf}_{0,7}\text{Ti}_{0,3}\text{O}_2$. Dielektrikukihi paksus oli umbes 10 nm. Ülemine elektrood valmistati plaatina vaakumaurustamisega läbi maski, milles olid avad läbimõõduga 50, 200 ja 500 μm . Need avad määrasid ülemise elektroodi ja sellega kogu mälukondensaatori pindala. Mälukondensaatori mahtuvust mõõdeti LCR mõtteseadmega E4980A. Esimesed mõõtmised viidi läbi sarimõõtmisrežiimis, nihkepinget rakendamata. Ette anti sagedusvahemik 1 kHz kuni 2 MHz, milles mõõdeti mahtuvuse sõltuvus sagedusest. Mõõtmine viidi läbi rakendades mõõtesignaali ruutkeskväärtusega 50 mV. Mõõtmispiirkonna valik oli automaatne. Mõõtetulemused on esitatud joonisel 4.



Joonis 4: Mälukondensaatori mahtuvuse sõltuvus sagedusest.

Nagu näha muutub mahtuvus suhteliselt vähe sageduse kasvades vahemikus 1 - 100 kHz. Sageduse edasise kasvuga algab mahtuvuse järsk vähenemine, nii et sagedusvahemikus 100 kHz – 2 MHz väheneb mahtuvus ligi 10 korda.

Järgmisena mõõdeti mahtuvuse sõltuvus nihkepingest erinevatel sagedustel samuti sarimõõtmisrežiimis. Ette anti nihkepinge väärtused vahemikus 1 V kuni -1 V ja igal järgneval mõõtetükkil muudeti mõõtesignaali sagedust (10 kHz, 50 kHz, 200 kHz, 1 MHz). Mõõtetulemused on esitatud joonisel 5.



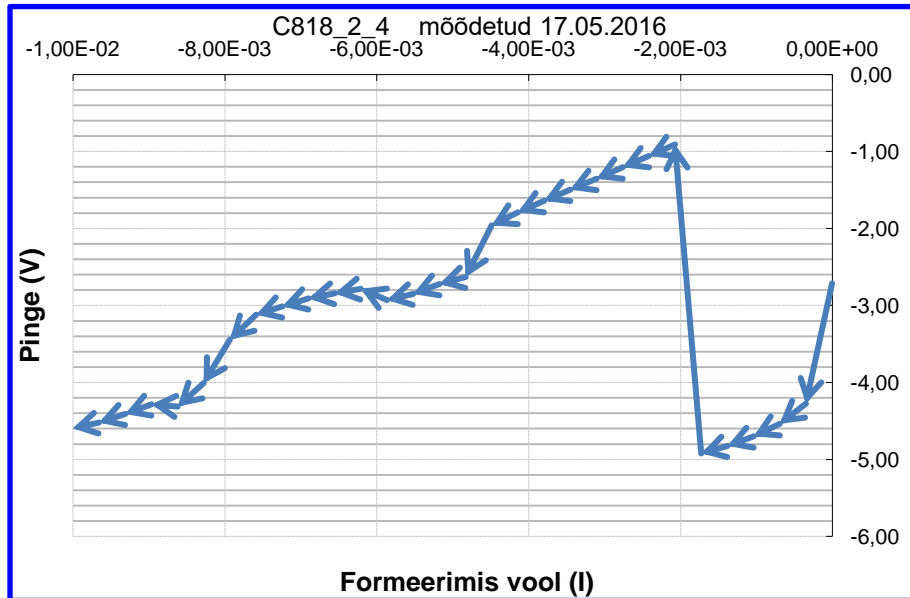
Joonis 5. Mälukondensaatori mahtuvuse sõltuvus nihkepingest erinevatel sagedustel.

Jooniselt on näha, et ühelgi mõõtesignaali sagedusel ei sõltu mahtuvus arvestataval määral nihkepinge väärtusest.

6.2 Takistusmäluelementide formeerimine ja mõõtmine

Takistusmäluna kasutati sama objekti, millel eelnevalt teostati mahtuvuse mõõtmised. Takistusmälu mõõtmiste esimeseks etapiks on mäluraku formeerimine. Konkreetse mäluraku formeerimine toimus voolu etteandmise režiimis. Mõõtmine viidi läbi seadmega Keithley 2636A sarimõõtmiste režiimis. Vooluallikaga anti konstantse sammuga ette 30 punkti negatiivse voolu väärtusi alates nullist kuni -10 mA-ni. Objekti kaitsmiseks seati pinge piirang -5 V nivoole.

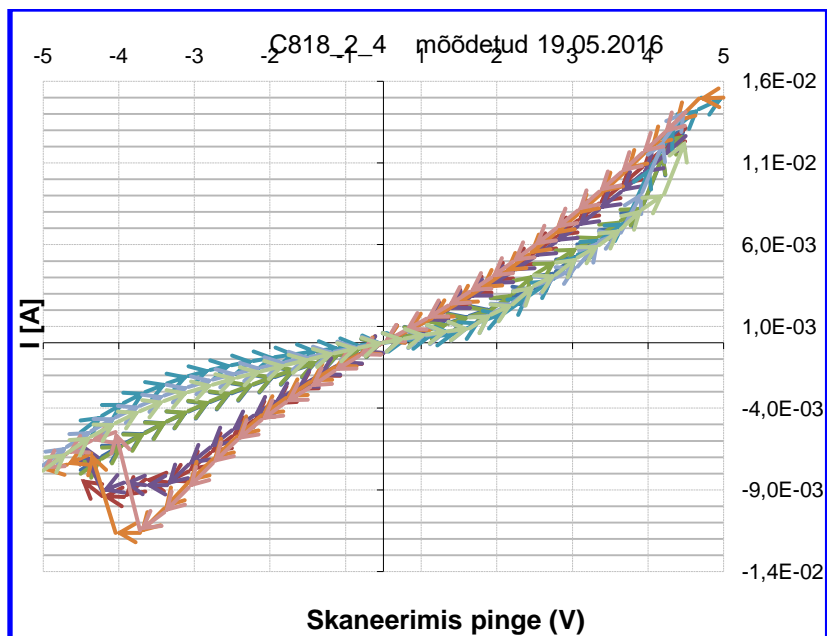
Voolu absoluutväärtust tõsteti iga 2 s möödumisel. Mõõteaparaat oli mõõtepiirkonna valiku automaatses režiimis. Formeerimisprotsessi ja selle jooksul saadud mõõtetulemusi kirjeldab joonis 6.



Joonis 6. RRAM mäloraku formeerimine vooluetteande režiimis.

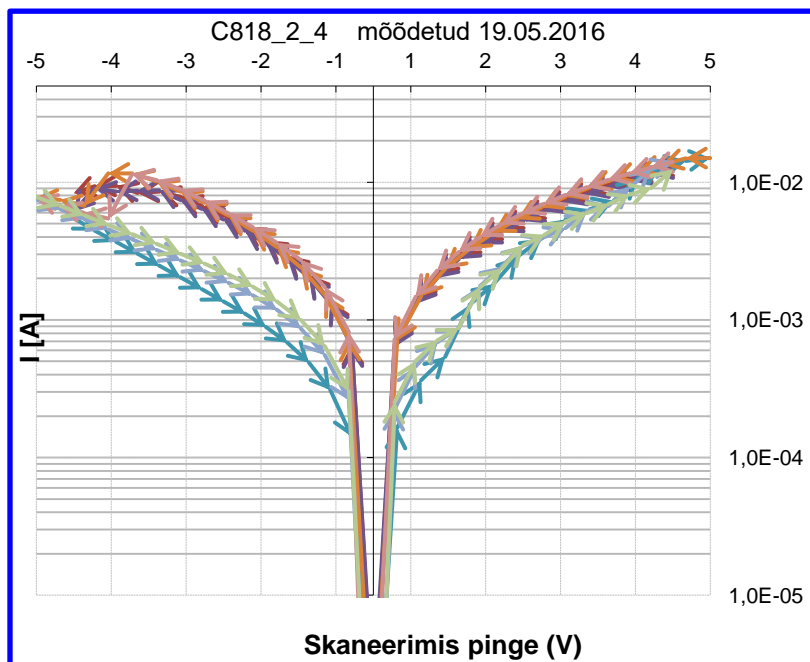
Jooniselt 6 on näha, et kui vool jõuab umbes -2 mA-ni väheneb pingelang mälorakul järsult 5 voldilt 1 voldile. Edasi suureneb pingelang lineaarselt voolu absoluutväärtusega. Sellist pingekäitumist võib pidada mäloraku formeerumiseks. Seda, et mälorakk tõepoolest formeerus, tõestavad järgnevad mõõtmised.

Takistusmälu mõõtmiste teise osana uuriti mäloraku ümberlülitumist. Selleks seadistati pingesallikas ette andma lineaarselt kasvavat pinget ja mõõdeti rakus kulgevat voolu. Mäloraku kaitsmiseks piirati voolu absoluutväärtus 10 mA tasemel. Mõõtmise toimus taas sarimõõtmiste režiimis. Pinge väärtused anti ette vahemikus 5 V kuni -5 V. Antud mõõtmised viidi erinevate pingepolaarsuste korral läbi eraldi mõõtettsükklitena. Mõõtetulemused on esitatud joonistel 7 ja 8. Joonisel 7 on volt-amper karakteristikad esitatud lineaarses mastaabis, joonisel 8 poollogaritmilisel kujul.



Joonis 7. RRAM mäloraku lülitumiskarakteristikad lineaarmastaabis.

RRAM lülitumise lineaarselt volt-amper-karakteristikalt on näha varem selgitatud kaheksasuunalist takistuselülitumist. Graafikult võib tuvastada voolude ligi 7 mA suuruse erinevuse mäloraku R_{SET} ja R_{RESET} oleku vahel. Mõõtetulemustest arvutatavad R_{RESET} ja R_{SET} väärtused olid pingel 1,1 V vastavalt $1,1k\Omega$ ja 400Ω .

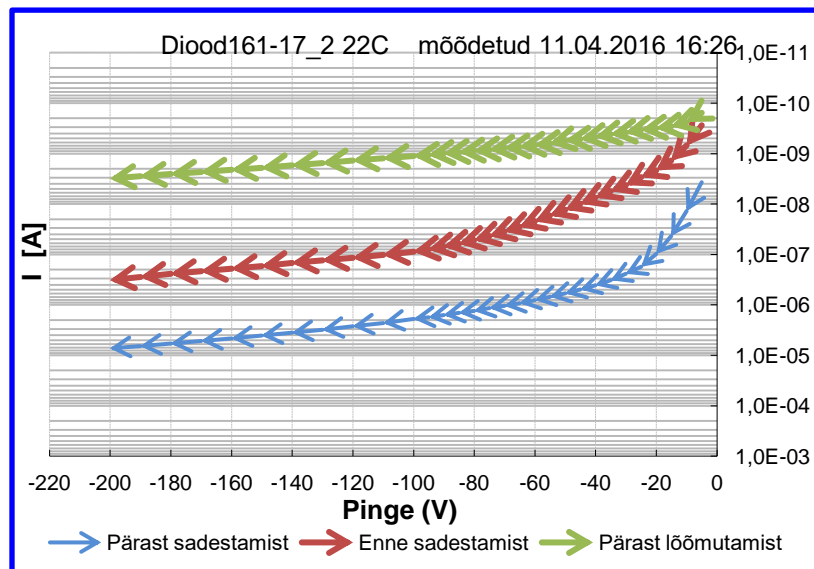


Joonis 8. RRAM mäloraku lülitumiskarakteristikad poollogaritmilises mastaaibis.

RRAM lülitumise poollogaritmilised volt-amper karakteristikad näitavad, et mäloraku R_{SET} ja R_{RESET} seisunditele vastavate voolude suhted sõltuvad pingest üsna vähe, kui mälorakule rakendatud pinged jäävad vahemikesse $-3.5... -0.8$ V ja $0,8...1,5$ V. Nendes pingevahemikes olekski siis võimalik mäloraku seisundit kõige usaldusväärsemalt mõõta.

6.3 Tarkvara ja mõõteaparatuuri rakendused GaAs jõudiodide voltamperkarakteristikate mõõtmisel

Mõõdetud jõudiodi pooljuhtmaterjaliks oli GaAs ning elektroodid olid valmistatud kullast. Jõudiodide oluline parameeter on p-n-siirde väike vastuvool. Vastuvoolude (joonis 9) mõõtmised viidi läbi GaAs jõudiodide valmistamiseks mõeldud pooljuhtstruktuuridel, millel olevate mesade külgpindu passiveeriti kiletehnoloogia laboris alumiiniumoksiidi kihiga, et vähendada siirde vastuvoolusid ja keskkonna mõju diodide karakteristikatele. Mõõtmised tehti temperatuuril 20°C enne ja pärast täiendava oksiidikihi sadestamist, passiveeritud struktuuri kuumutamise ajal 150 ja 200°C juures ja lõpuks temperatuuril 25°C .

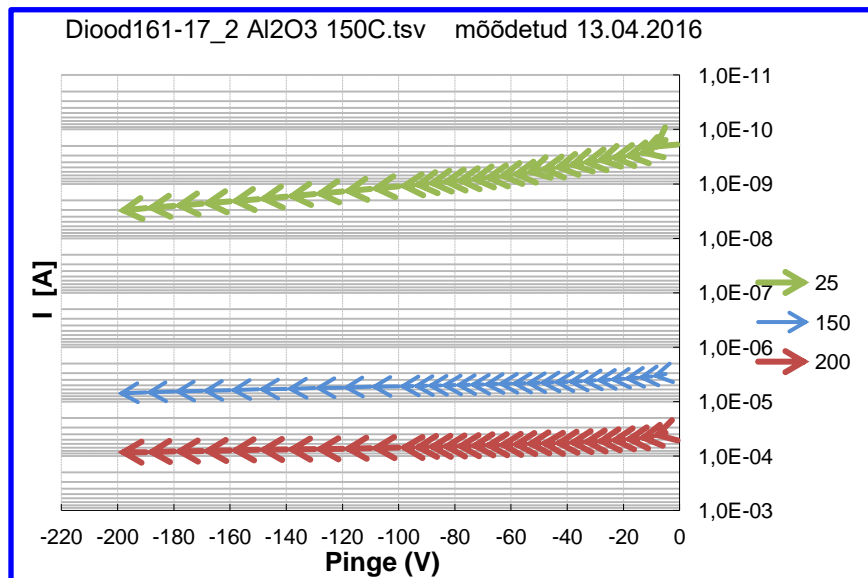


Joonis 9. GaAs diodi vastuvoolud enne ja pärast passiveerimist.

Mõõtmine toimus Keithley 2623Aga sarimõõtmiste režiimis. Ette anti 30 pinge väärtust vahemikus -5 V kuni -200 V ja mõõdeti voolu. Mõõteaparatuur oli seatud automaatsesse mõõtepiirkonna määramise režiimi, mida on mugav kasutada kui mõõtmised ei pea toimuma

väga kiiresti. Mõõtmised, mis tehti temperatuuril 20°C enne ja pärast passiveeriva katte sadestamist ja kuumutamisejärgselt temperatuuril 25°C (joonis 5) näitasid, et pinna passiveerimisel on oluline mõju tehtud GaAs diodide vastuvoolule.

Joonisel 9 on selgelt näha, et passiveeriva kihi sadestamine struktuuri pinnale viib esialgu vastuvoolu suurenemisele, kuid lõõmutamise tulemusel väheneb vastuvool mitu suurusjärku, nii et peale passiveerimist ja passiveeriva kihi lõõmutamist on vastuvoolud vähenenud esialgsete vooludega võrreldes ligi 2 suurusjärku. Lõõmutamise ajal (temperatuuridel 150 ja 200°C) ning lõõmutamise järel temperatuuril 25°C läbiviidud mõõtmiste tulemuste võrdlus on esitatud joonisel 10.



Joonis 10. GaAs diodi vastuvoolud erinevatel temperatuuridel.

Joonis näitab vastuvoolude tugevat sõltuvus temperatuurist, mida kõrgem on temperatuur, seda suuremad on lekkevoolud. Siiski on ka 200°C juures vastuvoolud veel piisavalt madalad selliste diodide edukaks kasutamiseks suure võimsusega alaldites ja pingemuundurites.

7 Kokkuvõte

Käesoleva töö käigus on vastavalt püstitatud eesmärkidele loodud sondijaama mõõteseadmete juhtimise tarkvara, mis võimaldab juhtida alalisvoolumõõteseadet volt-amper-karakteristikate mõõtmisel nii alalisvoolu- kui ka impulssrežiimis ning LCR-mõõteseadet impedantsimõõtmistel vahelduvvoolurežiimis sõltuvana vahelduvpinge (või -voolu) amplituudist ja sagedusest ning rakendatud alalisnihkepingest. Kõik mõõtmiste käigus kogutud andmed salvestatakse kokkulepitud formaadiga faili.

Tarkvara rakenduslikud mõõtmised õnnestusid ja mõõtetulemused olid ootuspärased. Valminud tarkvara võimaldab uurida kilelaboris valmistatud elektroonseid mälulemente ja ka teisi tahkisstruktuure. Tarkvara on leidnud praktilist rakendust juba selle valmimise käigus. Oluline on märkida, et tarkvara täiendamine toimub ka edaspidi. Kuna LabView võimaldab loodud programme kasutada ilma nende vormistamiseta koodkaitstud formaati, loob valminud tarkvara aluse mõõtevõimaluste edasiarendamiseks. Üldkasutuses olev programm on siiski mittemodifitseeritav, et vältida juhuslikke või pahatahtlikke muudatusi.

8 Summary

"Software for characterization of electrical memory cells with a probe station"

A software for electrical characterization of random access memory structures was developed. The software allows one to control operation of a source-meter Keithley 2636A and LCR-meter Agilent E4980A with a probe station CascadeMicrotech EPS150TRIAx. When applied with the Keithley 2636A source meter, the software enables measurement of I-V characteristics in DC and pulse mode. With Agilent E4980A LCR-meter, the software makes it possible to determine L, C and R in dependence of test signal level and frequency and as a function of bias voltage. All data received from measurement processes can be saved as a measurement file with a specific layout.

Test measurements were successful showing that the software meets the requirements set in the beginning of this work. The software developed makes it possible to conduct electrical forming and measurements of memristor cells and characterization of other solid state thin film structures. The software has already been applied for practical purposes during its development. It is important to emphasize that the development of the software can be continued in the future. As LabView allows one to run designed programs without exporting it into formats that do not allow modification of code, it is possible to make adjustments according to the need of researchers using the software. However, the program that is in general use is imported to the protected format, so that no unintentional or intentional changes could be made.

9 Kasutatud kirjandus

- [1] S. Mueller, Upgrading and repairing PCs, 22nd Ed., Pearson, 2015, p. 357.
- [2] D. S. Jeong, R. Thomas, R. S. Katiyar, J. F. Scott, H. Kohlstedt, A. Petraru ja C. S. Hwang, „Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status, *Reports on progress in physics*, **75**, 1-30 (2012).
- [3] I. Kärkkäinen, Resistive switching in ZrO₂ based metal-oxide-metal structures, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, 2014, pp. 11-17.
- [4] K. Fröhlich, „TiO₂-based structures for nanoscale memory applications," *Material Science in Semiconductor Processing*, **16**, 1186-1195 (2013).
- [5] J. S. Lee, S. Lee ja T. W. Noh, „Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches," *Applied Physics Reviews*, **2**, 031303-1-57 (2015).
- [6] „EPS150TRIAX a dedicated 150 mm manual probing solution for low-noise measurements," [Võrgumaterjal]. Saadaval: "https://www.cmicro.com/files/EPS150TRIAX_PF.pdf. [Kasutatud 7 mai 2016].
- [7] Low level measurements handbook: Precision DC current, voltage and resistance measurements, 6th Ed., Keithley Instruments, Inc., 2004, pp. 1-8.
- [8] Series 2600A System SourceMeter Instrument Reference Manual, Ohio, Cleveland: Keithley Instruments, Inc, 2011, pp. 1-2, 1-3.
- [9] „Triaksaalkaabel," Vikipeedia, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://et.wikipedia.org/wiki/Triaksaalkaabel>. [Kasutatud 7 mai 2016].
- [10] „LCR meter," Wikipedia, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://en.wikipedia.org/wiki/LCR_meter. [Kasutatud 5 mai 2015].
- [11] Agilent E4980A Precision LCR Meter: User's Guide, 9th Ed., Agilent Technologies, 2012, p. 38.

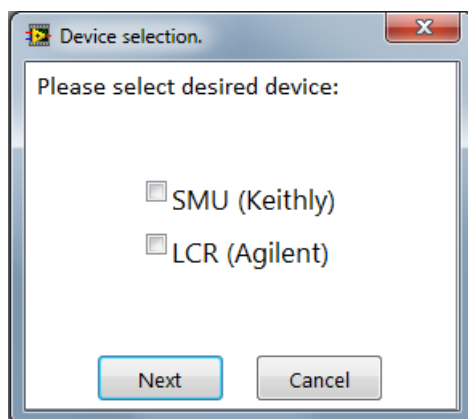
- [12] „IEEE-488,“ Vikipeedia, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://et.wikipedia.org/wiki/IEEE-488>. [Kasutatud 7 mai 2016].
- [13] „Oxide-based Resistive Memory Technology,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://phys.nsysu.edu.tw/ezfiles/85/1085/img/588/Oxide-basedResistiveMemoryTechnology_CHLien.pdf. [Kasutatud 5 mai 2016].

10 Lisad

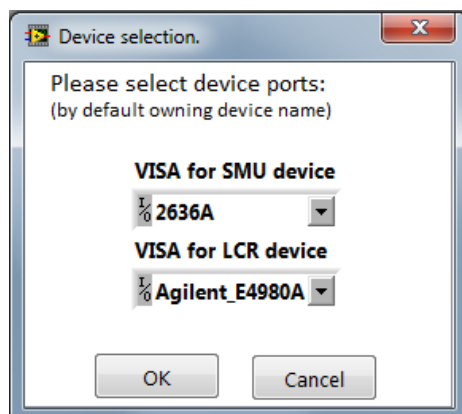
Lisa 1: Valitud peatükid "Sondijaama mõõteseadmete juhtimise tarkvara kasutusjuhendist".

1 Programmi käivitamine ja peatamine

1. Programm käivitub töölaua ikoonist nimega "**ProbeStation**".
2. Programm kuvab dialoogiakna, kus kasutaja valib kasutatava(d) seadme(d), tehes sobiva seadme nime ette linnukese. Kui seade on valitud, vajutage nuppu „**Next**“.



3. Järgnevalt küsib programm seadmete füüsilisi aadresse, mis on sondijaama arvutis nimetatud seadmete järgi. NB! Kui seadet pole nimekirjas, veenduge, et seade töötaks, vajadusel värskendge nimekirja valikuga „**Refresh**“. Kui soovitud seadmete aadressid on valitud, vajutage nuppu „**OK**“.



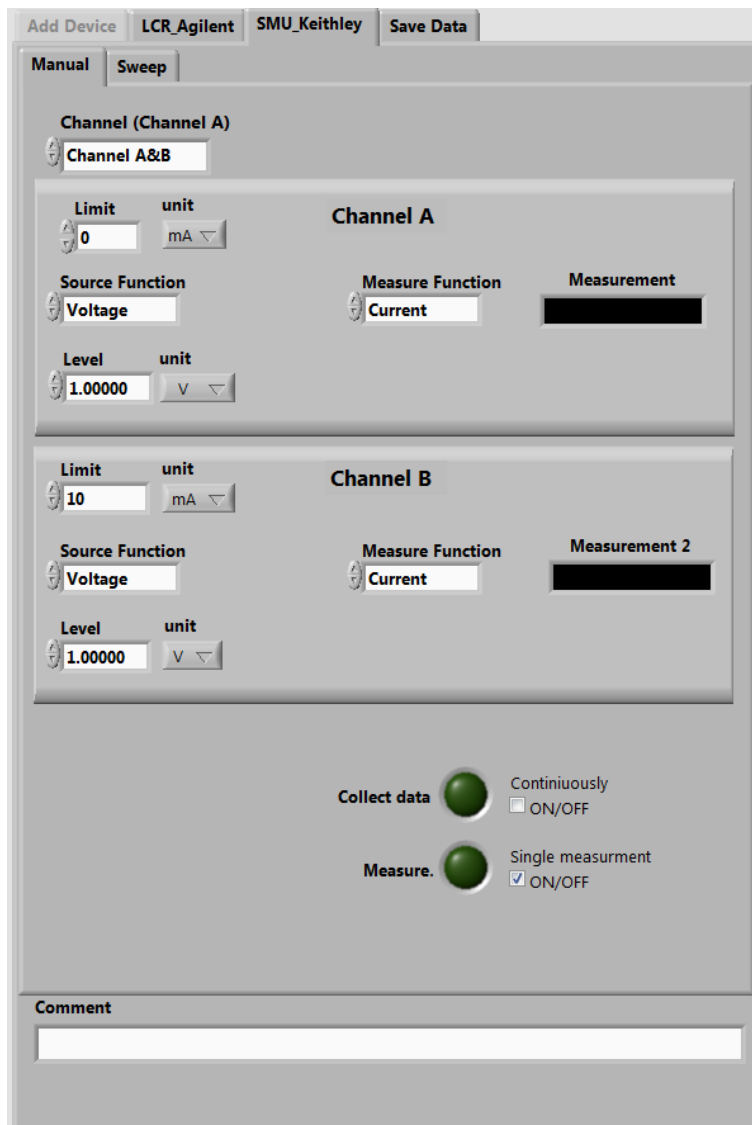
4. Ekraanile ilmub valitud mõõteseadmete graafiline juhtpaneel, kus saab asuda läbi viima mõõtmisi. (Vastavate mõõteaparatuuride seadistamine, mõõtmiste läbiviimine ja andmete salvestamine on selgitatud käesoleva juhendi eraldiseisvates peatükkides.)

5. Programmi sulgemisel veenuge, et olete salvestanud mõõteandmed. Programmi sulgemiseks peatage esmalt programm juhtpaneeli all paremal asuvast „**Stop**“ nupust.



2. Mõõtmised mõteseadmega Keithley 2636A

2.1 Üksikmõõtmiste režiim



Keithley 2636A üksikmõõtmiste režiimis saab kasutada kanalit A ja B või mõlemat korraga (A ja B).

1. Kanali valimiseks vajutage rippmenüül „**Channel**“.

Vastavalt mõõtmistele tuleb seadistad mõõteparaadi kanal(id).

3. Rippmenüüst „**Source Function**“ valige vastava allika režiim.

4. Rippmenüü „**Limit**“ lahtrisse kirjutage piiratava parameetri suurus.

Kui „**Source Function**“ on „**Voltage**“, siis on piiratavaks parameetrik vool. Kui aga „**Current**“, siis on piiratav ping.

5. Järgnevalt seadistage allika väljund väärtus parameetriga „**Level**“.

6. Seejärel valige rippmenüüst „**Measure Function**“ mõõtmisfunktsioon.

EELNENUD PUNKTIDE TÄITMISE JÄRJEKORD POLE OLULINE

7. Mõõtmisele võib lisada kommentaari lahtrisse „**Comment**“, kuid see peab olema lisatud enne mõõtmise alustamist.

Kommentaari lisatakse mõõtefaili vastava mõõtetulemuse kõrvale kommentaaride lahtrisse.

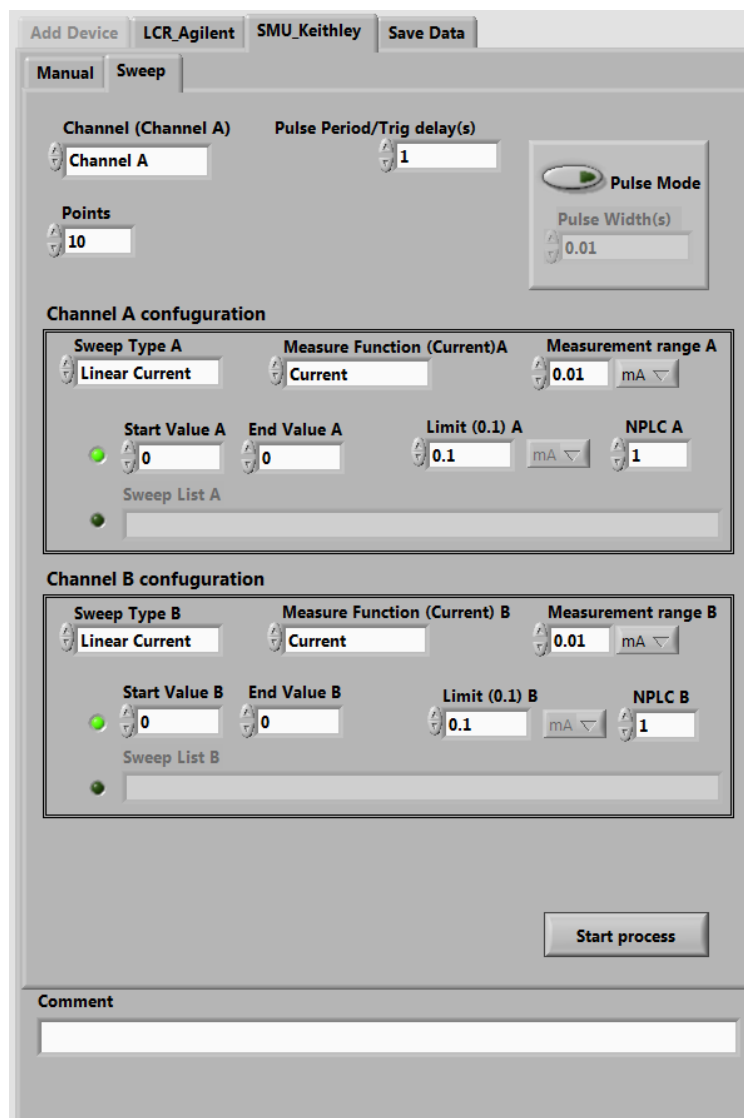
8. Selleks, et mõõtetulemus lisataks mõõtefaili puhvrisse, aktiveerige nupp „**Collect Data**“.
Kui soovite, et ka kõik järgnevad tulemused läheksid puhvrisse, tehke linnuke lahtrisse „**Continuously**“.

Kui eelnev punkt jätta täitmata, kuvatakse tulemus vaid lahtris „**Measurement**“.

(Mõõtefaili puhver on visualiseeritud seadistuste paneeli paremal küljel.)

9. Mõõtmise alustamiseks vajutage nuppu „**Measure**“ . Kui kõrval olevas lahtris „**Single Measurement**“ linnuke puudub, alustab programm automaatselt uut mõõtmist eelmise lõppedes.

2.2 Sarimõõtmiste režiim



Keithley 2636A

sarimõõterežiimis saab samuti kasutada valikuliselt kanaleid A ja B või mõlemaid korraga (A ja B).

1. Kanali valimiseks vajutage rippmenüül „**Channel**“.

Vastavalt mõõtmistele tuleb seadistada mõõteaparaadi kanal(id).

2. Määrake lahtris „**Points**“ mõõtetsükli punktide arvu.

3. Lahtrist „**Sweep Type**“, valige sarimõõtmisrežiim. Valida saab kas „**Linear**“, „**Logarithmic**“ või „**List**“ ning vastavalt, kas ette antakse voolu või pinge väärtused.

„**Linear**“ – punktide hulk genereeritakse kahe otspunkti („Start value“, „Stop value“) vahel lineaarselt.

„**Logarithmic**“ – punktide hulk genereeritakse kahe otspunkti („Start value“, „Stop value“) vahel logaritmiselt.

„**List**“ – Võimaldab kasutajal määrata käsitsi varieeritavate parameetrite hulga. Näiteks: „**1.2,1.3,1.4(5),1.5**“. Murdosa eraldajana kasutatakse punkti ja parameetrite eraldamiseks koma. „**(5)**“ punkti 1.4 järel on programmi lisafunktsionaalsus korrata vastavat punkti nii mitu korda, kui sulgudes täpsustatud. „**List**“ režiim ei vaja mõõtetsükli punktide arvu täpsustamist.

4. Seejärel valige rippmenüüst „**Measure Function**“ mõõtmisfunktsioon.

5. Määrake mõõteaparaadi mõõtmispiirkond lahtris „**Measurement range**“. See parameeter väljendub suurusjärguna. Kui soovite kasutada automaatset piirkonna valimise režiimi kirjutage lahtrisse 0.

6. Rippmenüü „**Limit**“ lahtrisse kirjutage piiritava parameetri suurus.

Kui „**Source Function**“ on „**Voltage**“ siis on piiratavaks parameetriks vool. Kui aga „**Current**“ siis on piiratav pinge.

7. Valige vastav mõõtesignaali keskmestamisparameeter „**NPLC**“ vahemikus 0.01-25.

NPLC väärtusele 1 vastab keskmestamisaeg 20 ms.

8. Mõõtmisele võib lisada kommentaari lahtrisse „**Comment**“, kuid see peab olema lisatud enne mõõtmise alustamist.

Kommentaar lisatakse mõõtefaili vastava mõõtetsükli kõrvale kommentaaride lahtrisse.

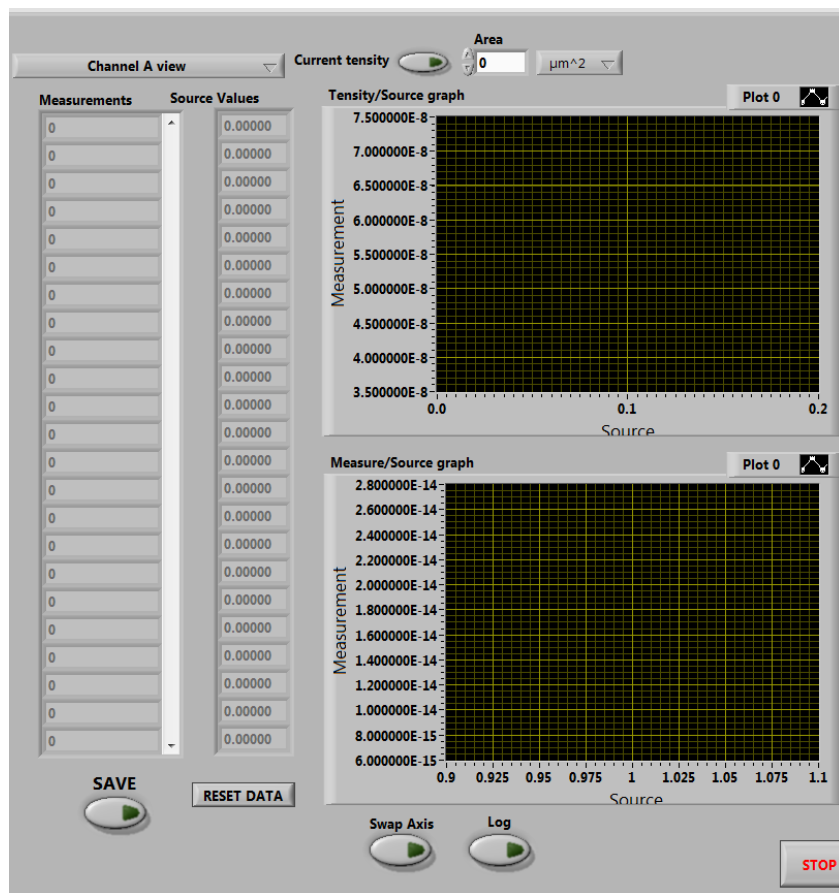
9. Seadistage muudetava parameetri muutmise ajaline samm sekundites lahtris „**Puls period/Trig delay**“.

10. Kui soovite mõõta impulss režiimis, aktiveerige nupp „**Pulse mode**“ ja määrake impulsi kestvus sekundites parameetriga „**Pulse Width**“. Impulss režiimis tähendab parameeter „**Pulse period/Trig delay**“ impulsi perioodi.

11. Käivitage mõõtmistsükkel nupust „**Start process**“.

Kuni mõõteseadme mõõtmisi läbi viib kuvatakse eelmainitud nupul kirjakest „**Sweeping**“. Mõõteprotsess on järgitav mõõteseadme ekraanilt.

2.3 Andmete kuvamine ja salvestamine



Nii sari kui üksikmõõtmiste tulemused ilmuvad juhtpaneeli paremasse külge.

Vastava kanali failipuhvris olevate andmete kuvamiseks valige rippnupust „**Channel X view**“.

X väljendab vastavalt kanalit A või B.

Failipuhvris olevad andmed kuvatakse otse graafikule „**Measure/Source graph**“.

Graafiku x-y telgede

vahetamiseks saab kasutada nuppu „**Swap axis**“.

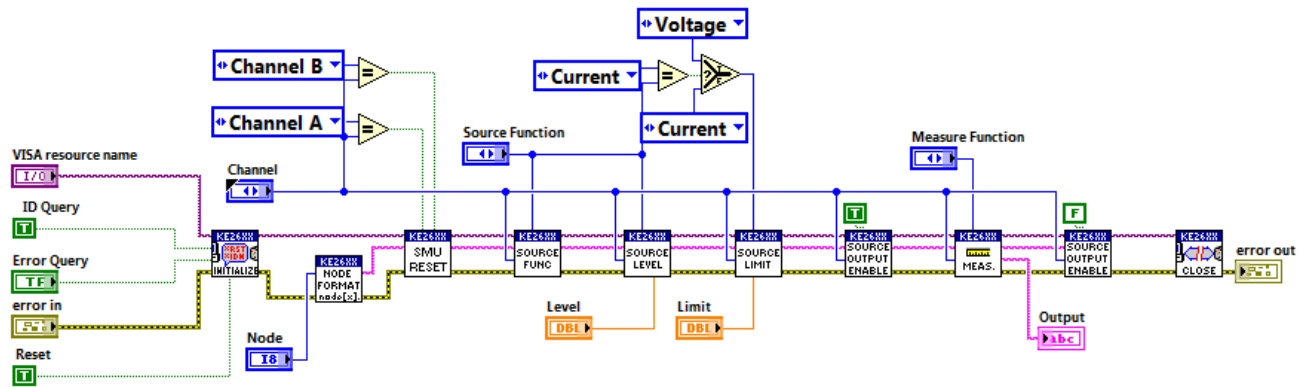
Mõõtetulemuste poollogaritmiliseks esitamiseks graafikul saab kasutada nuppu „**Log**“.

Selle tulemusel mõõtetulemuste absoluutväärtused esitatakse kümnendlogaritmina.

Juhul kui on teada sondi ja objektivaheline kontaktpindala võimaldab graafik „**Tensity/Source graph**“ kuvada voolutihedused. Selleks kirjutage lahtrisse „**Area**“ kontaktpindala ja valige vastav ühik. Graafiku genereerimiseks aktiveerige nupp „**Current tensity**“.

Kui mõõtetulemused on rahuldavad ja te soovite neid salvestada, vajutage nuppu „**SAVE**“. Kui soovite, et järgmised tulemused lisataks eelnevatele jätkake mõõtmistega, vastasel juhul tühjendage mälu puhver nupust „**RESET DATA**“.

Lisa 2. Arvuti suhtlus läbi mõõteseadme LabView draiverite.



Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Joonas Merisalu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “ Sondijaama juhtimise tarkvara elektriliste mälude uurimiseks ”, mille juhendaja on Jaan Aarik,

1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.