



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

TDK DOLGOZAT

REZISZTÍV KAPCSOLÓ RENDSZEREK ZAJJELENSÉGEINEK VIZSGÁLATA A MŰKÖDÉSI TARTOMÁNYUK FÜGGVÉNYÉBEN

Blaschek Ákos Kristóf

Természettudományi Kar

Témavezetők: **Balogh Zoltán**

egyetemi docens

BME Fizikai Intézet

Fizika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Kutatás háttérének bemutatása	3
2.1. Rezisztív kapcsoló rendszerek - Memrisztorok	3
2.2. Memrisztorok különböző fajtái	3
2.3. Memrisztorok alkalmazási lehetőségei	6
2.4. Memrisztorok zajdiagnosztikája	8
3. A vizsgált memrisztorok és a kísérleti technika bemutatása	11
3.1. Ezüst-ón ötvözet-alapú memrisztorok	11
3.2. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú rezisztív kapcsolók	12
3.3. Minták elektromos kikötése	14
3.4. Zajmérés kísérleti technikája és módszertana	15
4. Eredmények	18
4.1. Ezüst-ón-alapú memrisztorok vizsgálata	18
4.1.1. Elektroformázás folyamata és kapcsolási karakterisztikák	19
4.1.2. Relatív zaj ellenállásfüggésének vizsgálata	21
4.2. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú memrisztorok vizsgálata	24
4.2.1. Határfelület típusú működési mód kapcsolási karakterisztikái	24
4.2.2. Elektroformázás és filamentáris működési mód	24
4.3. Relatív zaj ellenállásfüggésének összehasonlítása különböző memrisztorokra .	27
4.4. Kitekintés, további tervek	29
5. Összefoglalás	30
6. Köszönetnyilvánítás	31

1. Bevezetés

Az elektronikai eszközökben tapasztalható zajjelenségekre jellemzően zavaró tényezőként tekintünk, azonban számos esetben a zaj hasznos eszköznek is bizonyulhat. Felhasználhatjuk például egy különleges jelként, ami lehetőséget nyújt az adott rendszer karakterizálására és működési folyamatainak megértésére [1, 2], de bizonyos alkalmazásokban (például sztochasztikus számítástechnika) akár értékes erőforrás is lehet [3, 4]. Egy adott eszközben megfigyelhető zajjelenségek függhetnek az eszközt alkotó anyagok minőségétől és fajtájától, a működési mechanizmus típusától, a gyártástechnológiától, valamint a működési paraméterektől és működési tartománytól is, ezért mélyebb megértésük hosszadalmas, de nagy jelentőséggel bíró folyamat mind technológiai, mint alapkutatási szempontból.

Változatos zajjelenségek figyelhetők meg a különféle rezisztív kapcsoló rendszerekben (memriszorok) is. Az ilyen eszközök kulcsfontosságú tulajdonsága, hogy ellenállás állapotuk feszültség alkalmazásával akár szinte analóg módon hangolható, ami alkalmassá teszi őket hardveres neurális hálózatokban való alkalmazásra szinaptikus súlyként [5, 6]. Alacsony energiafogyasztásuk, gyors működésük és akár nanométertől kisebb aktív tartományuk miatt a memriszorok ígéretes elektronikai építőelemek lehetnek a modern alkalmazásokban.

Célom az volt, hogy bekapcsolódjak a memriszorokkal foglalkozó kutatásokba, ezen belül pedig a memrisztív rendszereken végzett zajmérésekbe és aktív szerepet vállaljak a kutatócsoportunk munkájában. Ennek érdekében elsődleges célkitűzésem az volt, hogy megismerkedjek a zajmérésekhez használt mértechnikával és elsajátítsam a rendszer használatát, valamint a kiértékelési technikákat. További célkitűzésem volt, hogy minél több különböző működési elvű memrisztív rendszerrel megismerkedjek és megértsem azok működési és vezetési mechanizmusait, valamint zajkarakterisztikáját. A tanulási folyamatot már a kezdetektől olyan memrisztív minták vizsgálatán keresztül végeztem, melyek vizsgálata csoportunk aktuális kutatási projektjei között szerepel, így rögtön részt tudtam venni a külföldi kutatócsoportokkal együtt végzett munkában, ezzel megalapozva a további kutatási céljaimat is.

A TDK munkámban a kezdeti méréseim bemutatását tűztem ki, melynek keretében összefoglalom az ezüst-alapú AgSn elektródás, valamint az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú rezisztív kapcsolók rendszerek kezelésének (elektroformázás, stabil kapcsolások elérése) és a kezdeti zajmérések tapasztalatait. Továbbá összehasonlítom ezeket a rendszereket egymással és egyéb csoportban vizsgált memrisztív rendszerekkel, illetve egyszerű elméleti modellekkel, megfontolásokkal.

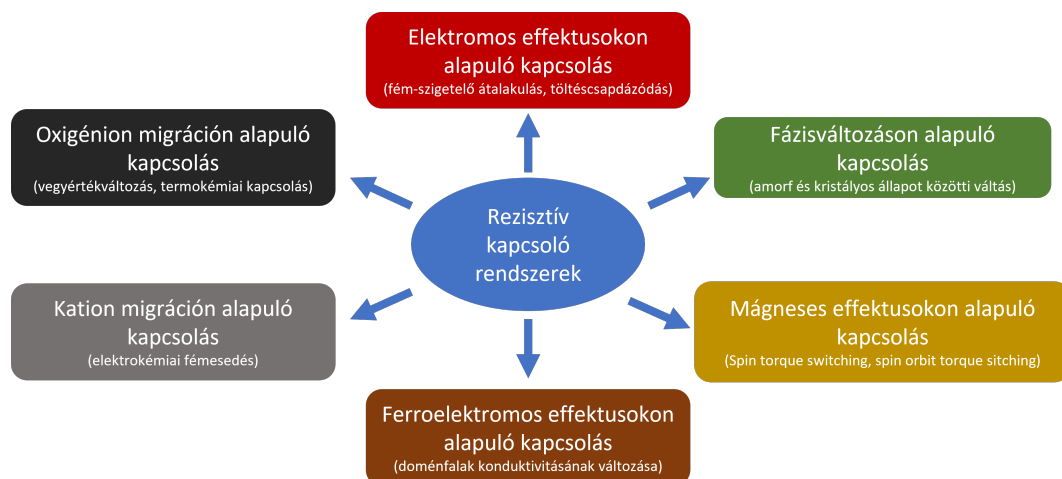
2. Kutatás háttérének bemutatása

2.1. Rezisztív kapcsoló rendszerek - Memrisztorok

Az ún. memrisztorok olyan rendszerek, melyek ellenállás-állapotát szabályozni lehet annak függvényében, hogy milyen előjelű és nagyságú feszültséget kapcsolunk rájuk. Jellemzően a különböző állapotokat nagy és kis ellenállású (másként be- és kikapcsolt) állapotnak nevezzük és a legtöbb memrisztív rendszer esetén ezen állapotok ellenállása akár szinte analóg módon is hangolható és a beállított értéket feszültség alkalmazása nélkül is megőrzi [6, 5, 7]. A memrisztorok ígéretes elektronikai építőelemek, mivel alacsony energiafogyasztás, gyors működés és akár nanométertől kisebb aktív tartomány és jó integrálhatóság jellemzi őket. Különböző memrisztív rendszerek kutatása így napjainkban egy nagyon aktív terület.

2.2. Memrisztorok különböző fajtái

A memrisztorokban lezajó ellenállás-változás mögött különböző fizikai mechanizmusok állhatnak, mint például az elektrokémiai fémesezés, vegyértékváltozás, fém-szigetelő fázisváltozás vagy akár mágneses és ferroelektromos fázisátalakulások [8]. Ezeket a legtipikusabb mechanizmusokat foglalja össze a 2.1. ábra.



2.1. ábra. Memrisztorok lehetséges kapcsolási mechanizmusainak összefoglalása.

Az *oxigén migráción alapuló kapcsolással* működő memrisztorok jellemző alkotó elemei a fémoxidok (pl. Ta_2O_5 , Nb_2O_5). Ezekben a rétegekben az oxigén ionok képesek mozogni, amennyiben megfelelő nagyságú áramot vezetünk rajtuk. Ilyenkor az oxigén ionok hiányokat (vakanciákat) hagynak hátra, azaz kialakul egy fém atomokban gazdagabb rész, ami képesek

a töltéseket szállítani. Ennek megfelelően az alacsony ellenállású állapotban az oxigén ionok nincsenek a kristálytani helyükön, ezért csökken a memrisztor ellenállása, míg nagy ellenállású állapotban az oxigén ionok visszatérnek a helyükre, ezáltal megnövelve az ellenállást [9, 10, 11].

Ezzel szemben a *kation migráció* (*elektrokémiai fémesedés*) alapuló kapcsolásnál az áram hatására vagy az aktív fém elektródából, vagy az szigetelő rétegből származó fém kationok kezdenek el akkumulálódni és így jön létre egy jól vezető tartomány, mely a feszültséggel hangolható és így állíthatók be a magas/alacsony ellenállású állapotok [12, 13, 14].

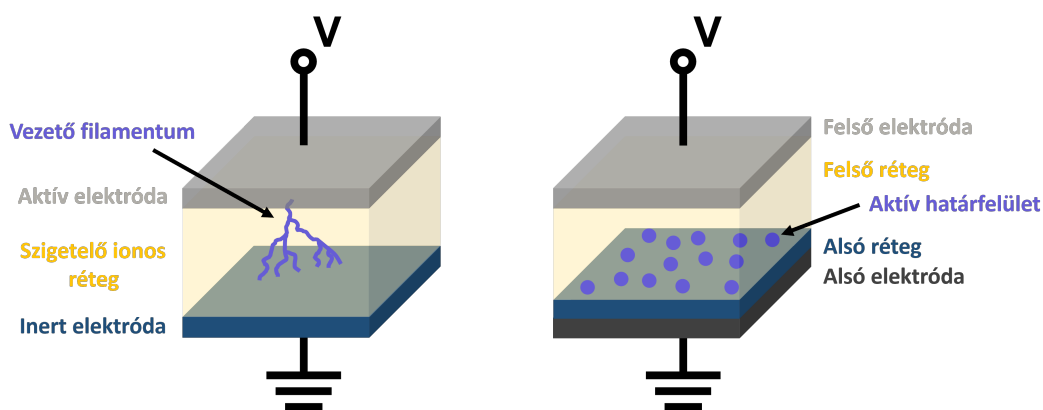
A fenti két gyakori működési mechanizmus mellett érdemes még megemlíteni a *ferroelektromos effektuson* és a *mágneses effektuson* alapuló kapcsolásokat is [15, 16]. Előbbi típusú memrisztorok egy része ferroelektromos anyagból áll. Ezek az anyagok elektromos dipólusok, mert a kötésben lévő atomjaiknak más a elektronnegativitása, ami miatt bizonyos atomoknak több elektron lesz a közelében mint önmagában lenne, a maradék atomoknak pedig kevesebb. Ha ez a ferroelektromos anyag elektromos térbe kerül, akkor a dipólusok beállása hangolható, mely ellenállás változásban nyilvánulhat meg. A mágneses effektuson alapuló memrisztorok esetén pedig mágneses dipólusok, mágneses domének hangolásával érhető el a rezisztív kapcsolás. Egy további lehetséges mechanizmus pedig, amikor az ellenállás változását a memrisztor aktív tartományában bekövetkező *fázisátalakulás* idézi elő. Ilyen fázisátalakulások történhetnek hőközlés, elektromos tér alkalmazása, vagy esetleg mágneses tér hatására is.

A kapcsolást vezérlő mechanizmusok alapvetően meghatározzák az adott memrisztív rendszer technológiai szempontból releváns tulajdonságait is, mint például a rendszer tartóssága, ellenállás kapcsolási aránya, vagy akár az állapotok zajszintje, ezért a különféle kapcsolásokon alapuló memrisztorok átfogó vizsgálata és tulajdonságaik összehasonlító elemzése fontos ahhoz, hogy kiválasztható legyen az optimális rendszer egy-egy adott alkalmazásra. A kapcsolási mechanizmus mellett azonban figyelembe kell venni a memrisztorok másik jellemző meghatározó tulajdonságát is, az aktív tartományuk struktúráját is, ugyanis ez szintén jelentősen befolyásolja az eszközök működését.

Az ún. *filamentáris memrisztorok* esetén két elektróda között található szigetelő (például valamilyen oxid) rétegben nagy feszültség alkalmazásával építhető fel az ún. filamentum, ami egy atomi nagyságú "hídként" fogható fel, amin az elektronok könnyebben mozoghatnak, így jó vezetőként funkcionál [11, 10, 12, 13, 14]. A filamentum további feszültség hatására még jobban felépülhet, és vastagodhat. Ekkor még kisebb ellenállása lesz a memrisztoroknak. Azonban, ha

ellentétes irányú feszültséget kapcsolunk rá, akkor a filamentum leépül, akár teljesen el is szakadhat, így előáll a nagy ellenállású állapot. A filamentáris memrisztorok jellemzője, hogy az aktív tartományuk, azaz a filamentum atomi méretskálájú, működtetésükhöz alacsony feszültség szükséges (1 – 2 V alatti kapcsolási feszültség) és ellenállásuk akár a jól vezető folytonos filamentáris tartományba ($10\ \Omega - 10\ k\Omega$) és akár az elszakadt filamentumra jellemző alagút jellegű vezetési tartományba ($10 - 100\ k\Omega$) is beállítható. A memrisztort felépítő anyagok, valamint a működési tartomány függvényében a megfigyelhető vezetési mechanizmusok is változatosak lehetnek. Jellemzően az oxigén, vagy kation migráción alapuló memrisztorok tartoznak a filamentáris memrisztorok közé, ilyenek például többek között a csoportunkban is vizsgált Ag_2S , AgI , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 rendszerek [12, 13, 14, 10, 11, 1], valamint az általam is vizsgált AgSn rendszer is [17], melyről a későbbiekben még részletesebben írok.

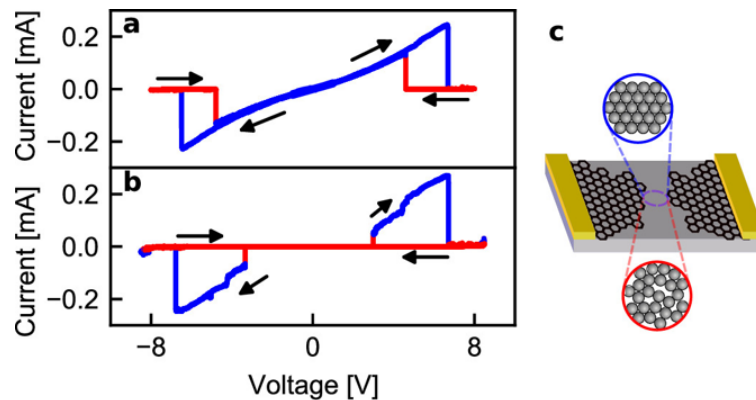
Az aktív tartomány struktúráját tekintve egy másik típus az ún. *határfelületi kapcsolást mutató* (angolul: interface-type) memrisztorok csoportja, melyek általában a két fémes elektróda között két különböző anyagi rétegből állnak. A kapcsolási folyamat a két réteg teljes határfelületén játszódik le tipikusan a rétegek közötti ion/fémion csere formájában. Ezeket a memrisztorokat nagyobb karakterisztikus méretskála (100 nm feletti), magas ellenállás és erős nemlineáris áram-feszültség karakterisztika, valamint magasabb 3 – 5 V kapcsolási feszültség jellemzi. Ebbe a csoportba tartoznak például a $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ perovszkit struktúrájú [18, 19], valamint az általam is vizsgált $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú rezisztív kapcsolók [20], utóbbi főbb tulajdonságait későbbiekben részletezem.



2.2. ábra. Filamentáris (balra) és határfelületi (jobbra) memrisztorok struktúrájának sematikus ábrázolása. Mind az elektródák, mind pedig a köztük lévő rétegek sokfélék lehetnek és ezekkel hangolhatóak a memrisztorok működési tulajdonságai.

A fentiekén túl olyan memrisztorokkal is találkozhatunk, ahol az aktív tartomány *tömbi jel-*

legű, azaz egy atomi méretskálától nagyobb térfogatban egyidőben zajlik a kapcsolás. Ez a struktúra főként fázisváltáson alapuló kapcsolások esetén jellemző, melyek filamentáris típusú memrisztorokhoz hasonlítanak felépítésük szempontjából: két elektródából és egy aktív rétegből állnak. Az ilyen rendszerek sok esetben unipoláris kapcsolást mutatnak, azaz a be- és kikapcsolás azonos előjelű feszültséggel is megtörténhet. Csoportunkban vizsgált memrisztorok közül ilyen elven működnek például a VO_2 -alapú memrisztorok [21, 22], melyek további érdekessége, hogy illékony memóriaként viselkedik, valamint a rezisztív kapcsolás nem csak elektromos úton, hanem a hőmérséklet változtatásával is elérhető. Egy másik szintén csoportunkban vizsgált fázisváltáson alapuló rendszer a SiO_x -alapú rezisztív kapcsoló, melyben egy kezdeti formázás hatására oxigénszegény térfogat alakul ki a SiO_2 rétegben, majd ennek a rétegnek a struktúrája változtatható feszültség alkalmazásával jól vezető kristályos és rosszul vezető amorf fázis között [23, 24, 25].



2.3. ábra. *a-b) SiO_x rezisztív kapcsoló tipikus áram-feszültség karakterisztikája (a) lassú, (b) gyors feszültségváltozás esetén. A SiO_x memrisztorokban megfigyelhető holtidő miatt a gyors (holtidő időskálájától gyorsabb) feszültségváltozás esetén a SiO_x rendszer unipoláris, nem illékony memóriaként funkcionál. c) Az amorf és kristályos fázisok demonstrációja. Az ábra csoportunk [25] publikációjából származik.*

2.3. Memrisztorok alkalmazási lehetőségei

A memrisztorok legkézenfekvőbb felhasználási lehetősége a memóriaként való alkalmazásuk. A memrisztorok mérete igen kicsi is lehet, akár az atomi nagyságrendbe is eshet, ezért sok memrisztor kis helyen is elfér, a különböző memrisztorok állapota pedig feszültséggel gyorsan állítható, a beállított állapotot pedig megőrzi feszültség alkalmazása nélkül is. Ha megfeleltjük a nagy ellenállású állapotot nullával és a kis ellenállású állapotot eggyel, akkor később a

kódolt adatokat alacsony feszültség alkalmazásával vissza tudjuk olvasni, így egy memóriát valósíthatunk meg. A kísérletek alapján a memrisztorok képesek lehetnek az ellenállás állapotuk megőrzésére, akár nagyon sok (10^6 - 10^8) kapcsolásig is, így a létrehozott memória tartós lehet és a flash memóriához képest energia hatékonyabb, mert az íráshoz és olvasáshoz alacsony (akár < 1) feszültség is elegendő, ehhez képest a tradicionális memória általában > 10 V-t használ [26, 27]. Ezek a tulajdonságai a memrisztoroknak a jövőben egy nagyon hasznos memória egyiséggé tehetik, amit az is mutat, hogy nagynevű cégek (Samsung, Panasonic, HP, IBM, Sony) is foglalkoznak a technológiával és a Panasonic már kereskedelmi forgalomban ki is adott olyan mikrokontrollert (MN101L), melyben memóriaként TaO_x -alapú memrosztort alkalmaznak [28].

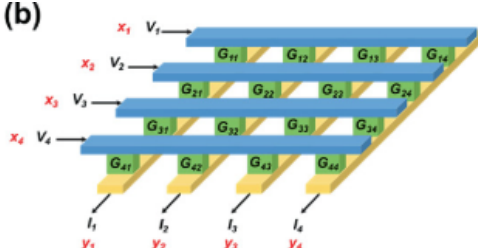
A mesterséges intelligenciához kapcsolódó technológiákban való felhasználás azonban egy sokkal izgalmasabb alkalmazási lehetősége a memrisztoroknak, melyben fontos szerepet játszik a szinte analóg módon állítható ellenállásuk [12, 7].

(a)

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}^T$$

$$y_j = \sum x_i a_{ij}$$

(b)



$$I_j = \sum V_i G_{ij}$$

2.4. ábra. Hardveres mátrixszorzás elvének reprezentálása [29].

A modern számítástechnikában a különféle neurális hálózatok futtatása rendkívül energiaigényes feladat, melynek egy fontos művelete a mátrixszorzás. Ezt meg lehet oldani sokkal könnyebben, ha veszünk egy memrisztor mátrixot, beállítjuk mindegyiknek az ellenállását úgy, hogy azok reprezentálják a szorzandó mátrix elemeit, majd a különböző zorokra a bemeneti vektornak megfelelő feszültségeket kapcsolunk és mérjük az oszlopokon folyó áramot. A Kirchoff-törvényeknek megfelelően az így kapott áramvektor éppen a mátrixszorzás eredményét adja meg. Tehát ezzel a módszerrel akár egy órajelen belül hardveresen el tudtuk végezni a szorzási műveletet a bonyolult szoftveres megvalósítás helyett. Ezt az elvet szemlélteti a 2.4. ábra.

2.4. Memriszorok zajdiagnosztikája

A hagyományos mérési technológiákban és alkalmazásokban a mért áram fluktuációja az elvárt áram körül egy jól ismert jelenség. Hétköznapi nyelvezetben zajnak szoktuk hívni, és általában zavaró tényezőnek számít, hiszen egy alacsony jel-zaj arány- amikor az amplitudója a fluktuációnak megközelíti az átlagos jel értéket- okozhat értékelhetetlen, nem kívánt eredményt. Ezért annak érdekében, hogy elterjedhessen egy új elektromos eszköz, a működésének feltalálásán kívül, szükséges a zaj tulajdonságainak vizsgálata, és az elektromos fluktuáció megszüntetése, amennyire csak lehetséges.

A zaj sokszor hasznos eszköz is lehet. Használható különleges jelként, ami segíthet a rendszer karakterizálásában és folyamatainak megértésében[30, 9, 1]. Ugyanakkor bizonyos helyzetekben (például sztochasztikus számítástechnikában) hasznos erőforrás is lehet [3, 4]. A különböző eszközökben megfigyelhető zajjelenségek függhetnek az eszközt felépítő anyagok tulajdonságaitól, működési paraméterektől, tartománytól is. Ezért ezeknek a folyamatoknak megértése nagy jelentőséggel bíró folyamat technológiai és kutatási szempontból.

Méréstechnikai szempontból a zajt precízen az ún. spektrális sűrűséggel (S) definiálhatjuk, ami a jel f_0 középfrekvencia körüli keskeny Δf sáv szélességű sávszűrőn keresztül mért szórásnégyzet és a Δf sáv szélesség közötti arányossági tényező. Ez képlettel kifejezve áramzaj esetére az alábbi:

$$\langle \Delta I(t|f_0, \Delta f)^2 \rangle = S_I(f_0) \cdot \Delta f,$$

mértékegysége pedig A^2/Hz .

Wiener-Khinchin-elmélet értelmében a zaj spektrális sűrűség függvénye a jel autokorrelációs függvényének Fourier-transzformáltjának kétszerese [2, 1]. Ebből következik, hogy a mérésekben a spektrális sűrűséget a mért mennyiség Fourier-transzformáltjából kaphatjuk, annak abszolútértéknégyzetekén, például áramzaj esetén véges mintavételezési frekvenciára és mérési időre az alábbi módon:

$$S_I(f) = \left\langle \frac{2\Delta t}{N} \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} \Delta I(n\Delta t) \exp(-i2\pi f n\Delta t) \right|^2 \right\rangle,$$

ahol Δt a mintavételezett pontok távolsága (azaz a mintavételezési frekvencia reciproka), míg N a felvett pontok száma.

A fenti spektrum mellett célszerű bevezetni egy olyan mennyiséget is, mely lehetőséget ad a különböző rendszerek praktikus összehasonlítására, ez az ún. relatív áram fluktuáció, melyet

az alábbi módon definiálhatunk:

$$\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} df S_I(f) / |I|},$$

ahol esetünkben $f_1 = 100 \text{ Hz}$ és $f_2 = 50 \text{ kHz}$ frekvenciatartomány került alkalmazásra, hogy a különböző memriszorok zaja összehasonlítható legyen.

Az elektromos zaj egyik fő típusa az ún. termikus zaj, amit Johnson-Nyquist (J-N) zajnak is neveznek. Ez a zaj megfigyelhető akkor is, ha a rendszeren nem esik feszültség, mert az elektronok véletlenszerű termikus fluktuációja okozza. A J-N zajnak fontos szerepe van az ultraszenzitív mérésekben és alkalmazásokban, ugyanis ez adja az elméleti alapzaj szintjét. Mellette, egy áramkörben, ahol áram folyik, megjelenik az elektronikus sörétzaj. Az elektronok egymástól független mozognak, azonban ha egy akadályba ütköznek, a tovább haladásuk véletlenszerű. Minden egyes továbbjutás statisztikailag független esemény, ami áramingadozásokhoz vezet, Poisson eloszlást követve. Ez egy frekvencia és hőmérséklet független, de áramerősség függő zajt eredményez. A sörétzaj általában elveszik a többi zajban, azonban különleges esetekben megjelenik, például nagy frekvenciájú és kis áramerősségű alkalmazásokban.

Elektronikai eszközökben, így memriszorokban is a legrelevánsabb zajtípus az $1/f$ -jellegű zaj, melyet én is vizsgálok a zajméréseim során. Ez a zaj azért keletkezik, mert a nanofizikai szerkezetekben végbemehetnek olyan dinamikus folyamatok, amik az adott rendszer vezetőképességét időben változtatják. Ilyen lehet például egy rezgő atom vagy egy rácshiba, aminek köszönhetően kialakul egy elektroncsapda, amibe az elektron bekerülhet, vagy kiszökhet onnan.

Ha feltesszük, hogy egy ilyen dinamikus szórócentrum következtében az vezetőképesség (G) két érték közötti véletlenszerű váltakozása jellemezhető egy karakterisztikus, τ idővel, akkor a vezetőképesség autokorrelációs függvénye leírható a következőképp:

$$C_G(\Delta t) = \langle \Delta G^2(t) \rangle \cdot e^{\frac{-|\Delta t|}{\tau}} \quad (1)$$

Mivel a zaj az autókorrelációs függvényének Fourier transzformáltjának abszolútértékénélgyezéből származtatható, a következő egyenletet kapjuk:

$$S_G(\omega) = \frac{4\tau \langle \Delta G^2(t) \rangle}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

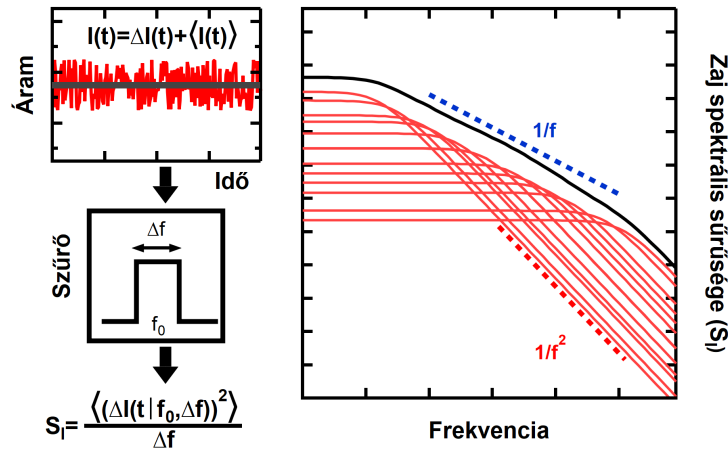
Ez az ún. Lorentz-jellegű zaj, mely az $\omega = \frac{1}{\tau}$ levágási frekvencia alatt konstans jellegű, utána pedig a frekvenciával négyzetesen csökken.

Egy összetett rendszerben (mint a memriszorok) általában egynél több ilyen dinamikus szórócentrum található különböző τ_i karakterisztikus időekkel, melyek zaja összeadódik. Amikor a

karakterisztikus időállandók logaritmikus skálán (közel) egyenletesen oszlanak el egy $1/f^\gamma$ -val arányos spektrális sűrűséget kapunk. A γ általában egyhez közeli, innen a zajtípus neve. Ezt mutatja be a 2.5. ábra jobb oldala.

Amikor a rendszerre egy V nagyságú meghajtófeszültséget kapcsolunk, akkor az előbbiekben részletezett vezetőképesség-zaj miatt egy $S_I(f) = S_G(f) \cdot V^2$ áramzajt tapasztalunk. Ha teljesül, hogy az eszköz lineáris $I(V)$ karakterisztikájú tartományába esik a meghajtófeszültség, valamint a feszültség nem gerjeszti a zajforrásokat, akkor a korábban bevezetett relatív fluktuáció feszültségfüggetlen, valamint fennáll a következő összefüggés:

$$\frac{\Delta I}{|I|} = \frac{\Delta V}{|V|} = \frac{\Delta G}{|G|} = \frac{\Delta R}{|R|}.$$



2.5. ábra. Bal oldalon a zaj teljesítménysűrűségének definíciója, jobb oldalon az $1/f$ zaj kialakulásának demonstrációja szórócentrumok sokasága esetén, az egyedi szórócentrumokat jellemző Lorentz görbe jellegű spektrumok szuperpozíciójaként [1].

Az $1/f$ -jellegű zajhoz kapcsolódó érdekesség, hogyha a megvizsgáljuk az $S \sim 1/f^\gamma$ spektrális sűrűséget és az abból származó szórást (a spektrális sűrűség teljes tartományra vett integrálja), arra jutunk, hogy a függvény divergens attól függetlenül, hogy γ egyenlő, nagyobb vagy kisebb mint egy. Ez arra engedne következtetni, hogy a zaj végtelen nagyságú, azonban a kísérletek nem erre engednek következtetni.

Egyrészt mérés technikai oldalról nézve elmondható, hogy a mérőrendszernek mindig van egy sáv szélessége, amelyből egy felső határ következik a frekvenciára, illetve a mintavételezési idő is véges, ami pedig egy alsó határt jelent. Másrészt pedig egy valós fizikai rendszerben egy adott frekvenciasávon kívül már nincsenek fluktuátorok, ezért $f \rightarrow 0$ esetén a Lorentz-függvények véges értéke miatt véges a spektrum, $f \rightarrow \infty$ esetén pedig f^{-2} -vel arányosan levág,

így az integrál nem divergens.

Az $1/f$ típusú zaj csökkentése az eszköztervezés egyik legfontosabb kihívása. Ahhoz, hogy elérjük a zajcsökkenését, szükséges tanulmányozni az adott eszközök zajjelenségeit, megérteni a zajforrásokat. A zajcsökkentés iránti igény mellett a zajt egy másik nézőpontból is vizsgálhatjuk: speciális jelként is felhasználható, ami segíthet megérteni az eszközben zajló mikroszkopikus folyamatok fizikáját. A zaj mint jel használata nem korlátozódik a kutatólaboratóriumokra; modern alkalmazásokban, például a valószínűségi számítógépes rendszerekben vagy neurális hálózatokban is felhasználható. Ezért a zajjelenségek részletes megértése alapvető fontosságú.

3. A vizsgált memrisztorok és a kísérleti technika bemutatása

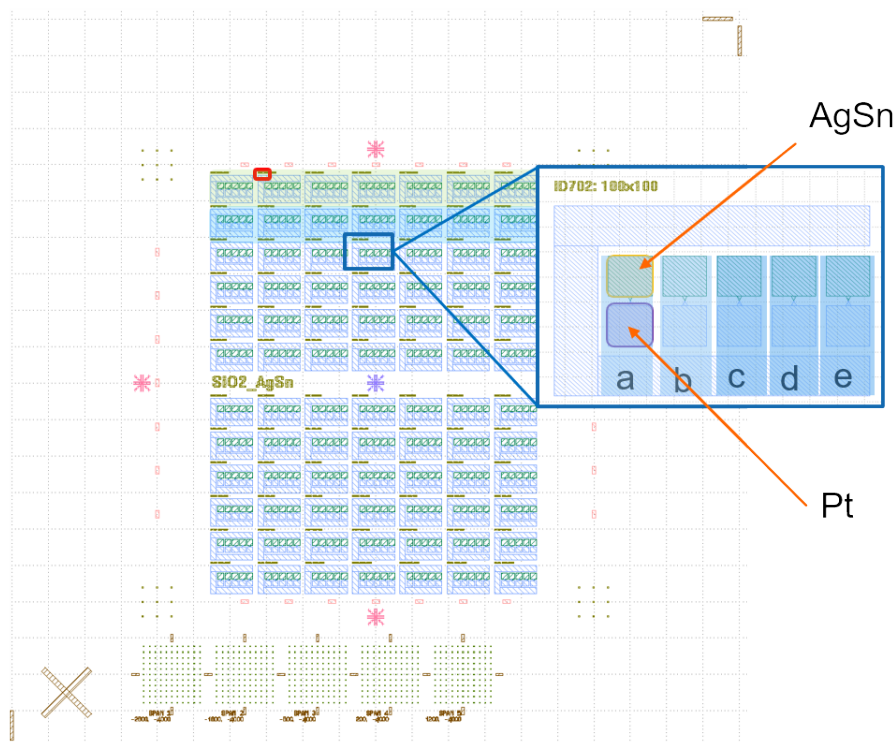
3.1. Ezüst-ón ötvözet-alapú memrisztorok

Az ezüst-ón-alapú mintát (röviden: AgSn) Jürg Leuthold (ETH Zürich) csoportjától kaptuk egy együttműködés keretében.

A minta esetén a memrisztorok egy 0.9×0.9 cm-es hordozón (chipen) találhatóak. Ezen a chipen litográfias eljárással 3.1. ábra szerint hoztak létre összesen 420 memrisztort, melyek 5-ös csoportokban (az ábrán jobb oldalt kiemelve) 7 oszlopba, 12 sorba lettek rendezve. A mintakészítés eljárását [17] cikkben írták le részletesen. A memrisztoroknak két elektródája van, amit a következő fejezetben bemutatásra kerülő tűszondás mérőállomással tudunk elektromosan kikötni. Ennél a mintánál minden egyes eszközhöz egy-egy pozitív és negatív kikötő elektróda tartozik, melyek egy-egy egymás alatt elhelyezkedő négyzetek (ld. 3.1. ábra jobb oldala).

Az alsó elektróda egy 3 nm Ti adhéziós rétegből és rajta egy 47 nm Pt rétegből áll, erre kerül az 5 nm vastag SiO_2 réteg, melyben a kapcsolás (filamentum kialakulása) történik. Az összesen 20 nm vastag felső elektróda 3 rétegből áll, alul 1 nm Ag, ezen szintén 1 nm Sn, majd 18 nm Ag található, melyre még egy 30 nm vastag Pt réteget építenek azért, hogy az oxidációt megakadályozza. A felső elektróda réteges (Ag és Sn) kialakítása azért volt szükséges, mert a tapasztalatok azt mutatták, hogy az ónnal való ötvözés hatására kevésbé volatilis jelleg figyelhető meg az egyszerű Ag elektródához képest. Ezenfelül a memrisztorok tartóssága is javul, akár 1000 kapcsolásra is képes, míg a tiszta fém 40 kapcsolás után tönkremegy [17].

Ez az AgSn memrisztor filamentáris kapcsolást mutat, ami egy elektroformázási folyamat hatására az oxid rétegben kiépülő ezüst filamentumnak tulajdonítható. Ebben a folyamatban az AgSn elektródára nagy pozitív feszültséget kapcsolva, annak hatására az Ag diffundál az



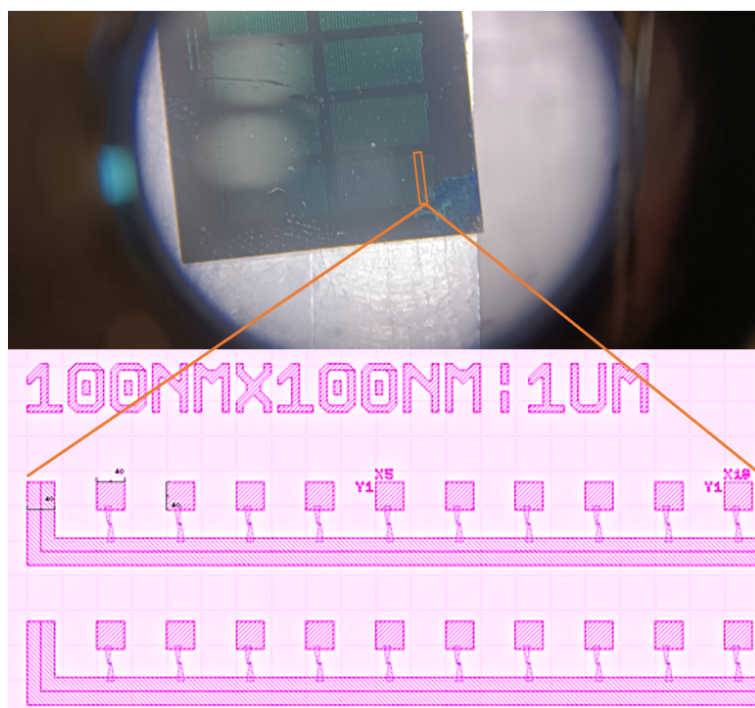
3.1. ábra. AgSn chip struktúrája

oxid rétegbe, ami miatt fokozatosan kiépül a filamentum, melyet a szintén bediffundáló ón segít stabilizálni [17]. Ellentétes irányú feszültséggel a filamentum elvékonyítható, vagy akár teljesen el is szakítható, majd újra pozitív feszültséget alkalmazva megint felépíthető és ezzel megvalósítható a rezisztív ki- és bekapcsolás.

3.2. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú rezisztív kapcsolók

Az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú rezisztív kapcsoló mintát a Forschungszentrum Jülich kutatóintézetből Susanne Hoffmann-Eifert csoportja biztosította számunkra, a kutatást velük való együttműködés keretében végezzük. A minta alapvető elektromos tulajdonságainak és a kapcsolás módjainak vizsgálatáról a jülichi kutatócsoport már készítette egy publikációt [20], ez alapján kezdtem megismerkedni a mintával.

A memrisztorok egy 2x2 cm-es hordozó lapon találhatók a kontaktus alapterülete (a keresztpont kontaktust kialakító elektródák metszetének területe) alapján 8 blokkba rendezve. Az egyes blokkok 32 sorból állnak, amikben 32 memrisztor van. A hordozón így összesen 8192 darab eszköz található. Minden sornak van egy saját vezetéke, ami kapcsolódik az egyes eszközök alsó (Pt) elektródájához, azaz 32 eszköz egy közös elektródával rendelkezik. Amikor ezen az elektródán nagyobb a potenciál, azt tekintjük pozitív feszültségnek. Az elrendezésben egy-egy

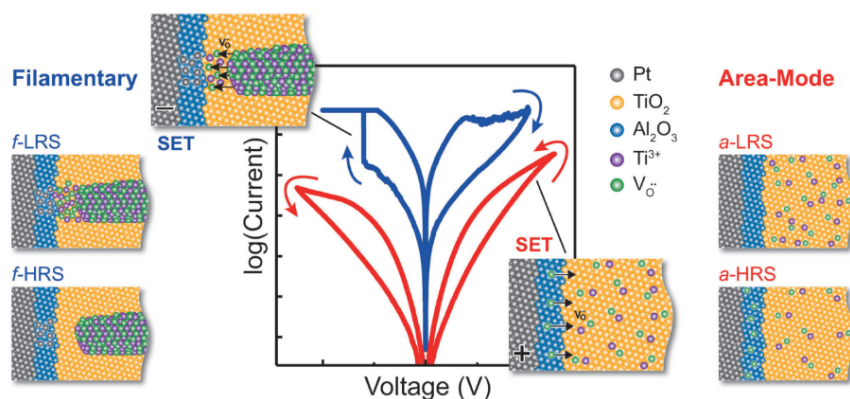


3.2. ábra. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ mikroszkóp alatt és chip struktúrája

sorban előlött található a 32 egyedi elektróda minden memrisztorhoz, amely a felső (Cr) elektródához kapcsolódik. A 3.2. ábrán látható a minta mikroszkóp alatti fotója és a struktúrájának rajza. Egy adott memrisztor a következőképp épül fel: az alsó 25 nm vastag Pt elektróda egy 5 nm Ta adhézios rétegre kerül, ezen található 1 nm vastag Al_2O_3 réteg, amin pedig 7 nm vastag TiO_x réteg helyezkedik el. A felső elektróda 5 nm vastag Cr réteg. A kereszpontkontaktus az egymásra merőleges alsó Pt és a felső Cr elektróda metszetében alakul ki, a minta laterális méretét (alapterületét) a két elektróda szélessége határozza meg. Érdekes még megemlíteni, hogy mivel a Cr-nak nagy az oxigén affinitása, ezért ezt még egy plusz 15 nm vastag platina réteg védi az oxidálódás ellen, azonban ez a réteg nem játszik aktív szerepet a működésben.

Ezeknek a memrisztoroknak az érdekes tulajdonsága, hogy a gyártást követően elektromos formázás nélkül határfelület jellegű kapcsolást mutatnak. Ekkor a kapcsolat maga az alagútátmenetként funkcionáló Al_2O_3 réteg és az erősen dópolt n-típus félvezetőként funkcionáló TiO_x réteg között jön létre az oxigén vakanciák két réteg közötti vándorlásának hatására bekövetkező TiO_x kiürítési rétegének vastagságának változása miatt. Pozitív feszültség hatására az oxigén vakanciák a TiO_x réteg felé mozdulnak és ezáltal csökken a minta ellenállása, míg negatív feszültség hatására egy visszarendeződés történik és így megvalósul a kikapcsolás. A folyamat szemléltetése a 3.3. ábrán jobb oldalt látható egy tipikus I(V) görbével (piros) együtt.

Az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú memrisztorok az AgSn memrisztorokhoz hasonlóan egy formázással



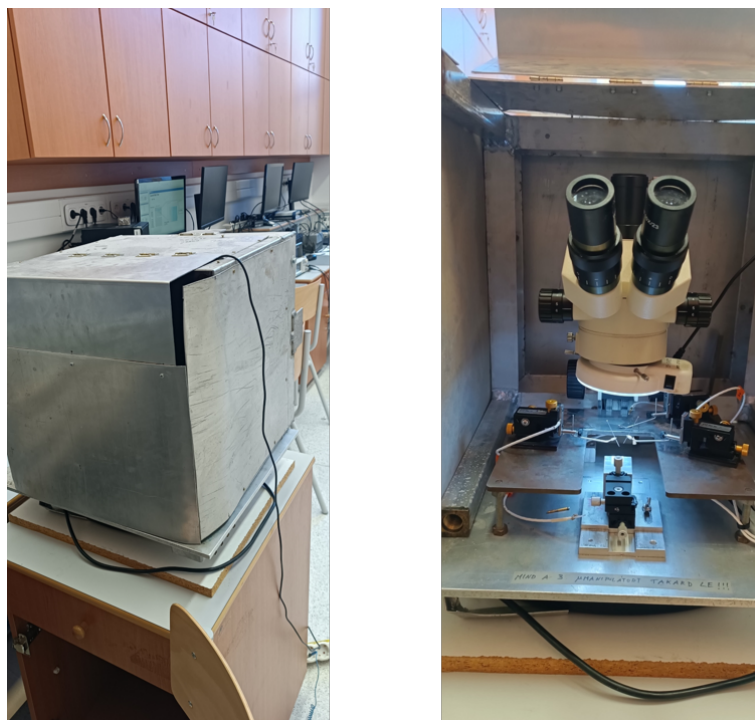
3.3. ábra. Az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ memrisztor kapcsolási mechanizmusai különböző módokban. Pirossal a határfelületi jellegű kapcsolásra, míg kékkel a filamentáris kapcsolásra jellemző $I(V)$ görbe. A jobb (bal) oldalon látható sematikus ábrák szemléltetik a filamentáris (határfelület jellegű) kapcsolási mód bekapcsolási folyamatát (SET) és magas (HRS), valamint alacsony (LRS) ellenállású állapotait. Az ábra a [20] publikációból származik.

filamentáris módba állíthatók. Ilyenkor nagy negatív feszültség hatására az TiO_2 rétegben Ti -ből kiépül egy filamentum, miközben az Al_2O_3 rétegbe az elektródából Pt ionok diffundálnak, így kialakul egy Pt -ban dús szintén filamentumszerű tartomány. Ha a két filamentum összeér, akkor előáll egy jól vezető állapot, ami ezután ellentétes feszültség alkalmazásával elvékonyítható, majd újra bekapcsolható. Ezt a folyamatot mutatja be a 3.3. ábra bal oldala, a rendszer tipikus filamentáris kapcsolási $I(V)$ görbéje pedig kékkel látható.

3.3. Minták elektromos kikötése

A tűszondás (3.4. ábra) borítása egy nagy fémdoboz, aminek a célja a rendszer árnyékolása, a környezeti zajok kiszűrése. Az elrendezés része egy BTC STM45 sztereómikroszkóp, azért szükséges, hogy a jellemzően kicsi ($10 - 100\mu\text{m}$ -es) kikötő elektródákat láthassuk. A mikroszkóp alatt egy XYZ irányban mozgatható mintatartó alap található, amire a mintákat tartalmazó chippet rakjuk. A minta elektromos kikötéséhez QuaterResearch XYZ300 mikromozgatókra szerelt wolfram tűket használunk. A tűszondás mérőállomás nagy előnye, hogy gyorsan tudunk mintákat elektromosan kikötni, így könnyen tudunk váltani a minták között. A bonyolult struktúra miatt viszont nehezen biztosítható a megfelelő árnyékolás, így a környezeti zajok elnyomása mérsékelt.

A minták kezdeti karakterizálásához a 3.5. ábra alsó (A üzemmód) paneljén látható áramkört



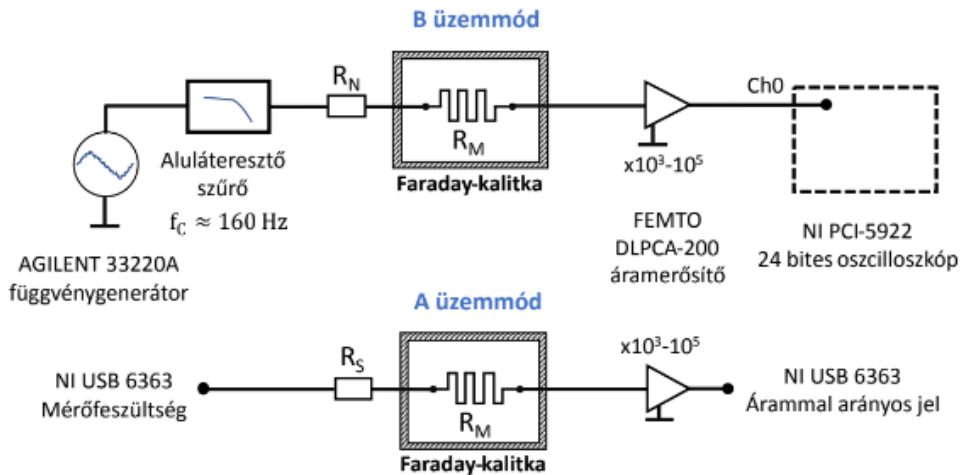
3.4. ábra. Balra: tűszondás mérőállomás külső nézete lezárt árnyékolódobozzal, jobbra: a mérőállomás belső nézete a mikroszkóppal, mintatartó lappal és a mikromozgatókkal.

rakjuk össze, amiben egy National Instruments USB-6363 mérőkártya, egy áramkorlátozóként funkcionáló soros ellenállás és egy FEMTO DLPCA-200 áramerősítő található. A rendszert a mérőkártya kimenetéről hajtjuk meg feszültséggel, a körben folyó áramot az erősítőn keresztül a mérőkártyával mérjük vissza.

Miközben próbálkozunk a elektromos kikötéssel, folyamatosan méréseket végzünk egy saját fejlesztésű mérőprogrammal, hogy lássuk sikeresek voltunk-e. Ha sikeresen kikötöttük a mintát, akkor karakterizáló méréseket végzünk. Ezeknek a méréseknek a célja az, hogy megvizsgáljuk a mintát, kapcsol-e, mutat-e bármilyen rendellenességet, milyen nagyságú a be- és kikapcsolt állapot ellenállása, illetve szükség esetén elektroformázást végzünk.

3.4. Zajmérés kísérleti technikája és módszertana

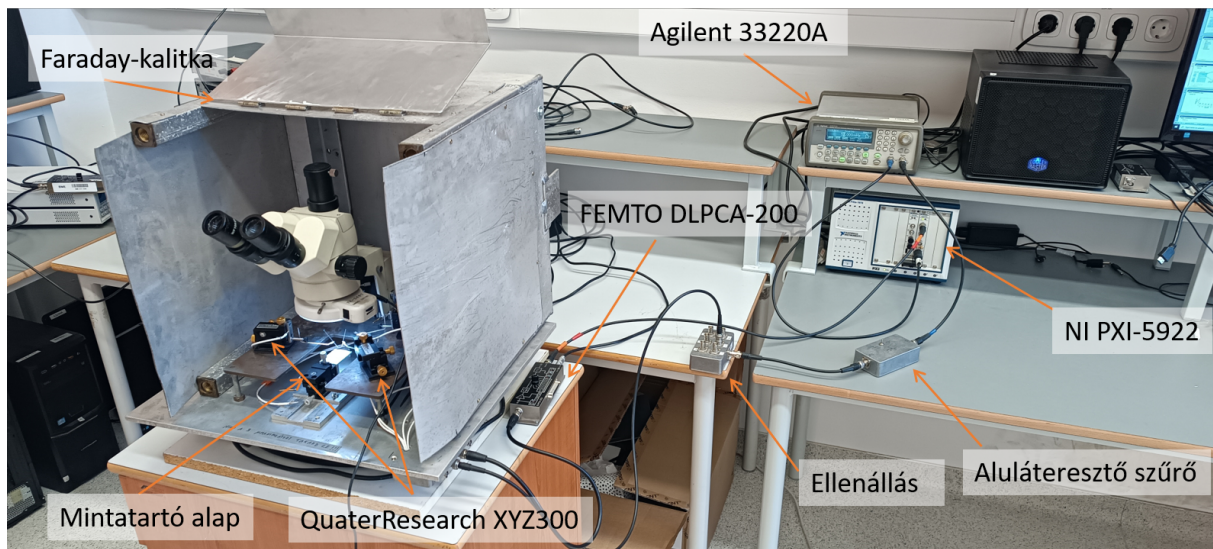
Ha az előző részben részletezett mérések során azt tapasztaljuk, hogy a minta stabil kapcsolási karakterisztikát mutat áttérünk a zajmérő elrendezés használatára melynek vázlatát a 3.5. ábra felső panelje (B üzemmód) mutatja, fotója pedig a 3.6. ábrán látható a tűszondás mérőállomással együtt. Itt az áramkört egy Agilent 33220A jelgenerátor hajtja meg, amit a számítógéppel tudunk irányítani. Utána egy aluláteresztő szűrő következik, ami a függvénygenerátor feszültség-



3.5. ábra. Felső panelt: a zajmérés mérőrendszerének sematikus rajza. Alsó panel: az egyszerű elektromos karakterizáláshoz használt elrendezés sematikus rajza. Az ábra Sánta Botond PhD értekezéséből származik [31].

zajának elnyomását biztosítja. Erre azért van szükség, mert a feszültségzajból a minta ellenál-lásával arányos áramzajt kapunk a mérésben, ami kis ellenállású állapotok esetén már nagy (a memriszorok $1/f$ -jellegű zajával összemérhető) zajt is lehet. A méréseimben használt egyszerű RC levágási frekvenciája 10Hz, így a vizsgált 100Hz feletti frekvenciákon a függvénygenerátor feszültségzaja már elenyésző. Az áramkörben jelen van egy soros ellenállás is, mely egyrészt az eszközök belső ellenállásából adódik, másrészt bizonyos esetekben (magasabb feszültségű mérés-ek) itt is bekötünk egy soros ellenállást áramkorlátozás céljából. A körben folyó áramot szintén egy FEMTO DLPCA-200 áramerősítővel erősítjük, aminek a kimenete az National Instruments PXI-5922 oszcilloszkóp kártyájára csatlakozik. Ez a speciális mérőkártya nagy felbontással ren-delkezik (az általunk használt 500kHz-es mintavételezési frekvencián 22bit), illetve bele van építve egy ún. anti-aliasing szűrő, ami elengedhetetlen a precíz zajmérésekhez. Ennek funk-ciója, hogy a mintavételi frekvenciától nagyobb frekvenciájú jeleket elnyomja, ugyanis, ha a mintavételi frekvenciától nagyobb frekvenciájú komponens is van a jelben, akkor a spektrum számításokat a Fourier-transzformáció során az aliasing jelensége miatt ez átlapolódik a kisebb frekvenciájú tartományba, ezzel elrontva a számított spektrumot.

A 3.7. ábrán látható egy ezzel a rendszerrel végzett tipikus mérés eredménye és mérési sémája. Ennek lényege, hogy először beállítjuk a vizsgálni kívánt alacsony, vagy magas el-lenállású állapotot (3.7.a) ábra). Ezután zajt mérünk alacsony feszültségen, ahol még lineáris a vizsgált memriszor áram-feszültség karakterisztikája, illetve még nem történik kapcsolat a

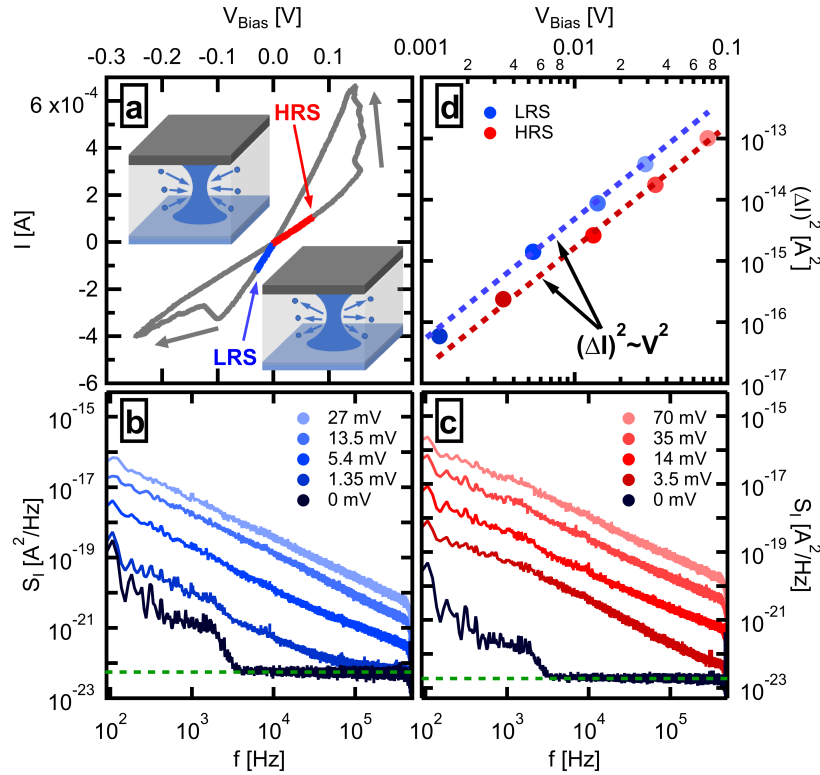


3.6. ábra. A zajmérés mérőrendszere a valóságban

zajmérés időskálája alatt. Ezután átkapcsoljuk a memrisztort és újra zajt mérünk. A 3.7.b-c) ábrákon láthatóak az alacsony és magas ellenállású állapotban mért tipikus zajspektrumok, melyeken jól megfigyelhető az $1/f$ -jellegű viselkedés, valamint az, hogy a feszültséggel arányosan növekszik a zajszint. A 3.7.d) ábrán a spektrum 100Hz és 50kHz közötti integráljának (ΔI^2) feszültségfüggése látható logaritmikus-logaritmikus skálán, melyről leolvasható a feszültségtől való négyzetes függés (logaritmikus-logaritmikus skálán 2-s meredekség). Fontos megemlíteni azonban, hogy ez a feszültségfüggés az Ohm-törvényből következik, azaz a memrisztor $1/f$ -jellegű vezetőképességzaja (ellenállászaja) a meghajtófeszültség hatására egy áramzajjává transzformálódik és ezért arányos a feszültség négyzetével. Azaz ilyen esetben a feszültség nem gerjeszti a zajt, csupán csak mérhetővé teszi azt.

Az imént ismertetett mérési sémához hasonlóan végeztem méréseket az AgSn mintákon is. A mintára mérésenként 20 – 20s hosszú $\pm 10 - 50$ mV-os meghajtófeszültségeket kapcsoltam (ezzel biztosítható volt, hogy a lineáris karakterisztikájú tartományban mérjek) és így mértem az állapotok zaját. Az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú minta filamentáris módjában hasonló feszültségeket alkalmaztam, azonban határfelület jellegű kapcsolási módban azt tapasztaltam, hogy a minta zajszintje közelebb esik az instrumentális háttérhez és alacsony feszültségek esetén nem is emelkedik ki abból, ezért a méréseket nagyobb feszültségnél kellett elvégezni, ami jellemzően $\pm 100, 200, 350$ és 500 mV-ot jelentett. A tapasztalat az volt, hogy ± 500 mV-os feszültség esetén érhető el, hogy minden ellenállás-állapotban kellően kiemelkedjen a háttérzajból a memrisztorok zaja, így az elemzéshez a -500 mV referencia feszültséget, ami egyezik a [20]

publikációban használt referencia feszültséggel.



3.7. ábra. a) Az Ag_2S -alapú filamentáris jellegű memrisztor tipikus kapcsolási görbéje és a filamentum vastagodásának/vékonyodásának. A pirossal (késsel) kiemelve a magas (alacsony) ellenállású állapotban végzett zajmérések feszültségtartománya. A kapcsolás irányát a szürke nyilak szemléltetik. b) alacsony c) magas ellenállású állapotban különböző feszültségek mellett mért zajspektrumok. Mindkét ábrán a fekete spektrum szemlélteti a meghajtás nélkül mért zajt, ami az eszközökből és a termikus zajból származik. Zöld szaggatott vonal mutatja az adott állapot ellenállása alapján számított termikus zaj szintjét [1].

4. Eredmények

4.1. Ezüst-ón-alapú memrisztorok vizsgálata

Az AgSn minta kapcsolási tulajdonságainak optimalizálását Elias Passerini (ETH Zürich) PhD-hallgató végezte [17] és az első zajmérések szintén általa történtek a laborunkban töltött vendégeskedése alatt. Ezek a mérések megmutatták, hogy az AgSn minták jól mérhető $1/f$ -jellegű zajt mutatnak és lefektették a későbbi vizsgálatok alapjait. Kutatómunkám ennek a rendszernek

a vizsgálatával kezdtem, hogy így a mérési technikák és kiértékelési módszerek megismerése mellett, rögtön bekapcsolódhassak egy aktív kutatási területbe. Elsődleges célom az volt, hogy önálló méréseket tudjak végezni és a korábbi eredményeket ki tudjam egészíteni olyan ellenállás-tartományokban, ahol eddig még nem (vagy csak kis számban) voltak mérési pontok.

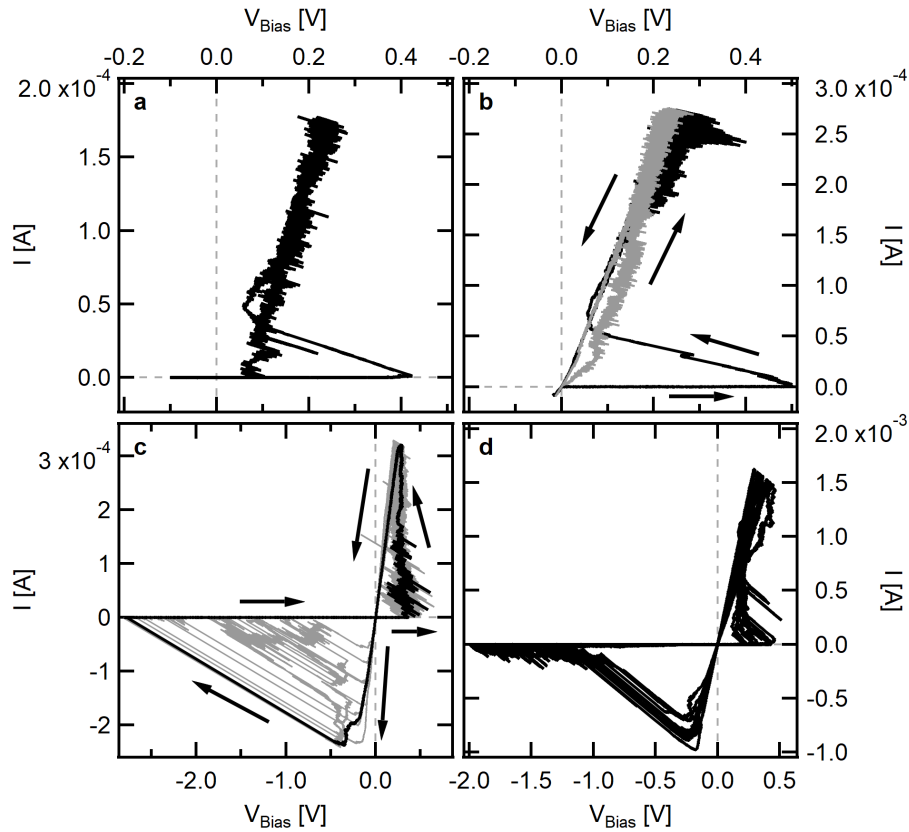
4.1.1. Elektroformázás folyamata és kapcsolási karakterisztikák

A minta gyártás utáni állapotban nem mutat stabil rezisztív kapcsoló viselkedést, ezért először szükséges a filamentum kialakítása, ami egy ún. elektromos formázással érhető el. Itt Elias cikkére és személyes segítségére támaszkodtam [17].

A formázás folyamata alatt célunk, hogy fokozatosan felépítsük a vezető filamentumot, ehhez több egymás utáni $I(V)$ karakterisztika mérést, azaz feszültség hangolást, végzünk a mintán nagy bekapcsolási (pozitív feszültség az AgSn elektródán) feszültséget, és mellé kicsi negatív feszültséget alkalmazva. A filamentum felépülésekor hirtelen fellépő nagy áramerősséget igyekszünk kerülni, ezért sorosan ellenállást kötünk be minden méréshez, ami korlátozza az áramkörben folyó áramot. Kezdetben $2 - (-0.5)$ V feszültséget kapcsolunk a mintára, ami azt jelenti, hogy a feszültség elindul 0 V-ról, nő 2 V-ig, csökken -0.5 V-ig, majd visszatér 0V-ba. Egy ilyen ciklust egy-két másodperc alatt végzünk el egyenletesen változtatva a feszültséget.

Az első néhány feszültség hangolási ciklus célja az, hogy a minta bekerüljön egy állandósult, a kezdeti ellenállástól kisebb ellenállású állapotba, amiből az eddig alkalmazott jellel már nem tudjuk kikapcsolni. Ekkor váltunk egy nagyságrenddel kisebb soros ellenállásra, így tudjuk elérni, hogy a lecsökkent ellenállású mintán újra nagy feszültség tudjon esni, aminek hatására újra ki tudjuk kapcsolni. A rendszer ekkor még nagyon instabil és néha illékony kapcsolást mutat, de a méréseket ismételve, a soros ellenállást több lépésben fokozatosan csökkentve és a feszültség pozitív/negatív amplitúdóját hangolva (tipikusan növelve) elérhető egy stabil és nem-illékony kapcsolás.

Egy tipikus formázási folyamatot mutat be a 4.1. ábra. Az első mérések során (4.1.a) ábra) a minta nem őrzi meg a bekapcsolt állapotát amikor lecsökken a rajta eső feszültség. Néhány ciklus hatására azonban már elérhető olyan állapot, ahol a bekapcsolt állapot megmarad, de még illékony jelleget mutat a rendszer. Ezt demonstrálja a 4.1.b) ábra, ahol fekete $I(V)$ görbén látható, hogy a minta nagy ellenállásból bekapcsol, majd a közvetlenül utána következő $I(V)$ görbe (szürke) egy nem teljesen kikapcsolt, de az előzőleg beállítottól nagyobb ellenállású állapotból indul. További ciklusok után a kapcsolás elkezd nem-illékonyá válni, azonban még jelentős



4.1. ábra. a) Formázatlan kapcsolás $I(V)$ karakterisztikája, melyen jól látszik, hogy a minta még nem őrzi meg a kis ellenállású állapotot. b) Két egymás után felvett $I(V)$ görbe a formázási folyamat közben, a fekete egy bekapcsolás, a szürke az utána következő mérés, amin látszik, hogy a bekapcsolt állapot kezd nem-illékonyan viselkedni, de két mérés között még enyhén magától kikapcsol. c) 9 egymás utáni $I(V)$ görbe, amikor a bekapcsolt állapot már nem-illékony, de a kapcsolás még erősen instabil. Feketével kiemelve egy (az első) kapcsolás. d) 10 egymás utáni kapcsolás a formázás végén, ekkor a rendszer már nem-illékony és stabil kapcsolást mutat. Az b) és c) paneleken látható nyilak mutatják a görbék körüljárási irányát. A feszültség hangolást mindig zérustól pozitív értékek irányába indítjuk. Az áram minden ábrán a mintán eső feszültség ($V_{\text{Bias}} = V_{\text{Meghajto}} - I \cdot R_{\text{soros}}$) függvényében került ábrázolásra.

instabilitást tapasztalhatunk, ahogy az a 4.1.c) ábrán is megfigyelhető, azonban a formázást folytatva, tipikusan 50 körüli $I(V)$ ciklus után lehetséges elérni egy stabil és állapotmegőrző módot. Egy ilyen állapotban mutat 10 egymás utáni kapcsolást a 4.1.d) ábra.

A fent bemutatott formázási folyamat elve egyszerűnek hangzik, azonban a gyakorlati kivitelezése sok rutint igényel, mivel rosszul megválasztott feszültségamplitúdó, vagy soros ellenállás esetén előfordulhat, hogy a filamentum felépülése "megszalad", így a minta egy nagyon

kis ellenállású állapotba kerül, amiből a rendelkezésre álló kísérleti technikával már nem tudjuk kikapcsolni, vagy a kikapcsoláshoz olyan nagy feszültség/áram szükséges, hogy az károsítja a mintát. Méréseim során először nehézkesen sikerült elérni a stabilan kapcsoló filamentáris állapotot, több memrisztor, nagyjából 20 került használhatatlan (túl kicsi ellenállás, vagy ebből történő kikapcsolás után szakadás) állapotba. Azonban Elias segítségével sikerült optimalizálni a formázási folyamatot és kidolgozni egy nagyjából irányelvet a formázási lépésekre, melyet betartva és begyakorolva egyre stabilabban tudtam sikeresen elvégezni a formázást.

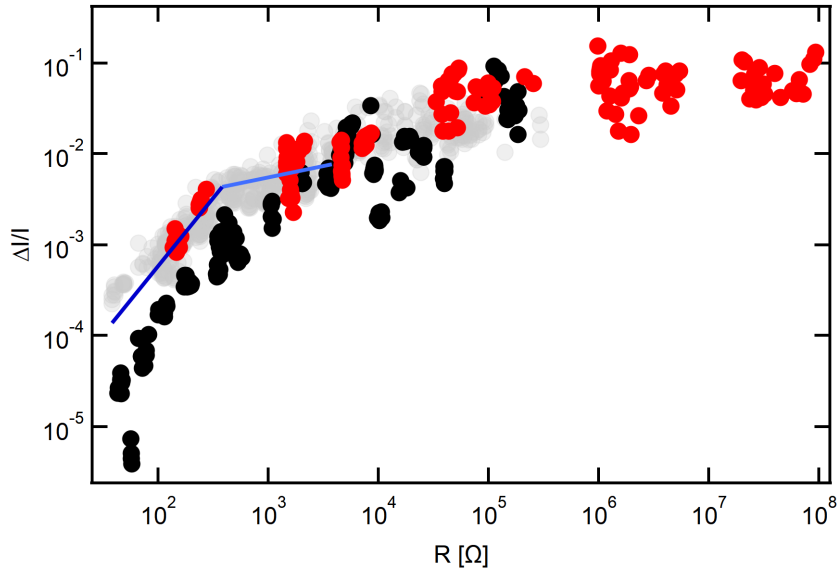
Ez csoportunk szempontjából fontos eredmény, ugyanis ahhoz, hogy a zajkarakteristikákat vizsgálni tudjuk stabilan működő filamentáris kapcsolás szükséges, azonban ezt eddig nem tuduk előállítani (korábbi méréseket Elias végezte a formázással együtt). Munkámnak köszönhetően mostanra sikerült jó kihozattal előállítani a jól működő filamentáris állapotokat és így biztosítani a zajmérések alapvető feltételét.

4.1.2. Relatív zaj ellenállásfüggésének vizsgálata

Csoportunkban már végeztek zajméréseket ezüst-alapú memrisztorokon (Ag_2S , AgI) és tiszta Ag nanovezetéken is [30, 9]. A különböző rendszerek relatív áram fluktuációjának ellenállásfüggésének összehasonlításával csoportunk arra jutott, hogy ezekben az ezüst-alapú memrisztorokban a $1/f$ -típusú zaj nagysága univerzális, mert a három mért rendszer azonos zajkarakteristikát mutatott. Továbbá sikerült egy modellt is felállítani, amivel a relatív zaj ellenállásfüggésében megfigyelhető trend jól magyarázható a diffúzív-ballisztikus vezetés közti átmenettel. A modell segítségével pedig megbecsülhető az elektronok átlagos szabadúthossza, illetve a dinamikus szórócentrumok sűrűsége.

Ezeket a méréseket pásztázó alagútmikroszkóp technikával létrehozott memrisztorokon mérték. Ennek lényege, hogy az egyik elektródaaként funkcionáló Pt/Ir tűt egy $\text{Ag/Ag}_2\text{S}$ vagy Ag/AgI rétegbe nyomják bele és itt alakul ki maga a memrisztív filament. Ez a technika laboratóriumi körülmények között jól alkalmazható és könnyen létrehozható vele egymás után több függetlennek tekinthető memrisztor is, azonban a komplex kialakítás miatt konkrét eszközökbe nem beépíthető. Ezért merült fel a kérdés, hogy az alkalmazásokhoz közelebb álló, akár mikrochipre is integrálható ún. keresztpont kontaktusokban kialakított memrisztorok esetén milyen zajkarakteristikát figyelhetünk meg és mennyire jellemző az univerzalitás.

A 4.2. ábra mutatja az AgSn minta (fekete és piros) és referenciaként az Ag_2S minta (világosszürke) relatív áram fluktuációját az ellenállás függvényében. Az összehasonlító elemzéshez



4.2. ábra. Az AgSn rendszer relatív áramfluktuációja az ellenállás függvényében. Feketével jelölve Elias Passerini mérési eredményei, pirossal pedig a saját méréseim eredményei. Háttérben világosszürkével a referenciaként használt Ag_2S -alapú rendszer mérési pontjai, valamint a diffúzív (sötétkék) és ballisztikus (világoskék) tartományra jellemző $\sim R^{3/2}$ és $\sim R^{1/4}$ ellenállásfüggésnek megfelelő illesztések [30, 1].

célszerű minden rendelkezésre álló adatot felhasználni, ezért az ábrán szerepelnek Elias Passerini méréseinek pontjai (fekete) is, viszont a saját munkám elkülöníthetőségének megkönnyítése végett saját méréseim eredményeit piros pontokkal ábrázoltam.

Tekintsük át először az Ag_2S referencia rendszerhez tartozó pontokat (szürke), melyeken jól megfigyelhető egy törés a $100\ \Omega$ - $1\ \text{k}\Omega$ tartományban. A töréspont alatt a relatív zaj erősebb ellenállásfüggést mutat, míg felette gyengébbet. Csoportunk modellje alapján a két tartomány a diffúzív és ballisztikus vezetési tartománnyal azonosítható, melyekben a $\Delta I/I$ rendre $R^{3/2}$ -del és $R^{1/4}$ -del arányos. Ezeket a trendeket szemléltetik a sötétkék és világoskék vonalak, melyek a [30] publikációból átvett fixált exponensű illesztések.

Ha összevetjük az AgSn minta (fekete és piros) zajkarakteristikáját az Ag_2S referencia rendszerével, a 4.2. ábráról megállapítható, hogy az alacsony (pár $100\ \Omega$ körüli) ellenállású tartományban az AgSn némiképp kisebb relatív zajszintet mutat, mint az Ag_2S , de a diffúzív vezetésre jellemző $\Delta I/I \sim R^{3/2}$ ellenállásfüggés itt is megfigyelhető. A néhány $\text{k}\Omega$ -os tartományban a két rendszer relatív zajszintje már hasonlóan nagyságú és az AgSn minta esetén az átmenet, a diffúzív ballisztikus vezetés között, kevésbé hangsúlyos és mintha a nagyobb ellenállások felé tolódna. Ebből megállapítható, hogy az AgSn rendszer az egyéb ezüstalapú rendszerekhez

nagyon hasonló viselkedést mutat, azonban fontos megemlíteni, hogy még az általam végzett mérésekkel együtt is viszonylag kevés mérési adat áll rendelkezésre ahhoz, hogy végső következtetés lehessen levonni, ezért további célom a mérések folytatása ezen a rendszeren is, hogy minél folytonosabban le tudjam fenti a teljes ellenállás-tartományt. További érdekesség az is, hogy a $100\ \Omega$ - $1\ \text{k}\Omega$ -os tartományban az általam mért pontok némileg magasabb relatív zajt mutatnak, mint a korábbi mérések pontjai, illetve jobban átfednek az Ag_2S adatokkal. Ez is azt mutatja, hogy érdemes további méréseket végezni trendek és zajszintek pontosabb tisztázása céljából.

Az AgSn rendszeren végzett zajméréseim másik fontos célja a nagy ellenállású ($> 100\ \text{k}\Omega$) tartomány vizsgálata volt, melynek motivációja többértű. Egyrészt ebben a tartományban nem történtek mérések a csoport korábbi munkáiban az ezüst-alapú rendszereken, aminek oka, hogy ez a tartomány az elszakadt filamentumhoz tartozik, ahol a rendszer sokkal érzékenyebb a pásztázó alagúmikroszkóp technikánál fellépő mechanikai instabilitásra. Az AgSn minta kereszt-pont kontaktus kialakítása viszont kiküszöböli a mechanikai instabilitás problémáját, ezért jó lehetőséget teremt ennek az ellenállás-tartománynak a vizsgálatára. Másrészt ez a tartomány átfed a másik általam vizsgált memrisztív rendszer ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$) határfelületi kapcsolási módjának működési tartományával, így lehetőségem adódhat a zajkarakterisztikák összehasonlítására.

Méréseimben sikerült több nagy ellenállású állapotot is előállítani (egészen $100\ \text{M}\Omega$ -ig) és ezekben az állapotokban zajt mérni. Eredményeim alapján pedig megállapítható, hogy az AgSn minták relatív zajszintje a $100\ \text{k}\Omega$ - $100\ \text{M}\Omega$ tartományban konstans jellegű. Csoportunk korábbi munkájában hasonló ellenállásfüggetlen (konstans) relatív zajszintet figyelt meg grafén nanorészek relatív zajának ellenállásfüggésének vizsgálata során [32]. Ennek eredetét az alagutazásos vezetést leíró Simmons-formulán alapuló numerikus szimulációk segítségével a résméret fluktuációkkal tudták magyarázni. Ezen eredmények alapján én is konstans zajszintet vártam ebben az ellenállás-tartományban, amivel a méréseimben megfigyelt trend egyezik. Ez megerősíti azt a feltételezést, hogy ez az ellenállás-tartomány valóban az elszakadt filamentumhoz tartozik, a zaj fizikai eredete pedig egy olyan mennyiség, mely az alagútáramot leíró formula exponensében található, mint például az elszakadt filamentum résmérete.

4.2. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú memrisztorok vizsgálata

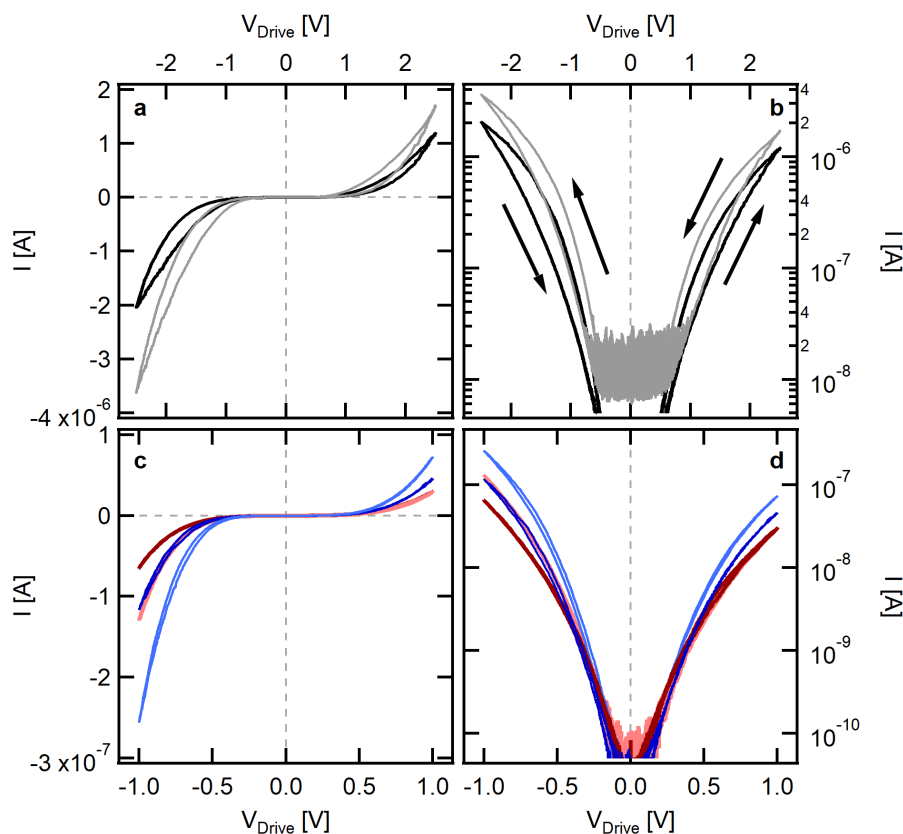
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ rendszeren korábban még nem történtek zajmérések, így kutatócsoportunk és ezen belül az én célom a rendszer zajdiagnostikájának megkezdése volt, melynek első lépéseként megismerkedtem a minta kezelésével, meghatároztam a jellemző zajszintet és az alkalmazandó mérési protokollt, valamint vizsgáltam a zaj ellenállásfüggését.

4.2.1. Határfelület típusú működési mód kapcsolási karakterisztikái

A határfelület típusú kapcsolási mód 10 s hosszú 2.5 V háromszögjel meghajtás mellett mért tipikus $I(V)$ görbéit mutatja a 4.3. ábra egy $300\times 300\text{ nm}^2$ (szürke) és egy $100\times 100\text{ nm}^2$ (fekete) keresztmetszetű minta esetén lineári-lineáris és logaritmus-lineáris skálán. A bekapcsolás akkor történik, amikor $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x/\text{Cr}$ struktúra Pt elektródáján magasabb a feszültség, ezt definiáljuk pozitív előjelű feszültségként. Az Ohm-törvénynek megfelelően, ahogy azt a [20] publikációban is megmutatták, a $300\times 300\text{ nm}^2$ minta ellenállása kisebb, azaz adott feszültségnél nagyobb áramot mérhetünk rajta. A görbék alakja szignifikánsan eltér a filamentáris jellegű görbék "masnira" hasonlító alakjátóktól, az ilyen határfelületi kapcsolást mutató memrisztorok ellenállása nagy, a kapcsoláskor nem figyelhető meg hirtelen (ugrásszerű) ellenállás-változás és az áram-feszültség karakterisztika erős nemlinearitást mutat. Emiatt az erős nemlineáris jelleg miatt egy kapcsolási görbe felvételekor az áram több nagyságrendet is változhat, az erősítést viszont úgy kell megválasztani, hogy a maximális áramerősség se haladja meg a telítési küszöböt, amiből az következik, hogy a kis feszültségnél jellemző kis áramokat már nem tudjuk felbontani. Ez látható a 4.3.b ábra zérus feszültség körüli részén is, ahol az erősítő zajszintje miatt már nem tudjuk felbontani a görbéket. Az ellenállás-állapotok precízebb megállapítása érdekében ezért magasabb erősítésben, alacsonyabb (1 V meghajtás) mellett is történtek karakterizáló mérések, melyek $I(V)$ görbéi láthatók a 4.3.c-d) ábrán, ahonnan még jobban leolvasható, hogy a $100\times 100\text{ nm}^2$ -es minta ellenállása alacsony (sötétpiros) és magas (sötétkék) ellenállású állapotban is nagyobb, mint a $300\times 300\text{ nm}^2$ -es minta megfelelő (világospiros és világoskék) állapotaiban.

4.2.2. Elektroformázás és filamentáris működési mód

Az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ memrisztorok kezdetben felületi módban működnek. Azonban az AgSn memrisztorokhoz hasonlóan elektroformázással filamentáris módba állíthatók. A formázás folyamata egyszerűbb, mint az AgSn esetén: jülichi kollégák [20] publikációja alapján egy egyszeri



4.3. ábra. Kapcsoló $I(V)$ görbék fekete $100 \times 100 \text{ nm}^2$ és szürke $300 \times 300 \text{ nm}^2$ memrisztorokon. a) panelen lineáris-lineáris skálán, b) panelen logaritmikus-lineáris skálán ábrázolva. Az erősítést választással az volt a cél, hogy széles tartományban tudjunk áramot mérni, és ne menjünk telítésbe, amikor nagy az áram. Az állandósult állapotok $I(V)$ karakterisztikája c) lineáris-lineáris d) logaritmikus-lineáris skálán. Sötétpirossal (világospirossal) és sötétkékkel (világoskékkel) $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ($300 \times 300 \text{ nm}^2$) memrisztor magas és alacsony ellenállású állapotai. Az állandósult állapotok mérésekor elegendő kisebb meghajtójelet használunk, így az erősítés is optimálisabban megválasztható, ezért alacsonyabb áramértékig fel tudjuk bontani a görbket.

lassú ($\sim 1 \text{ V/s}$ rátájú) $3 - 4 \text{ V}$ -os feszültséghangolást végezve $10 - 50 \mu\text{A}$ áramkorlátozást alkalmazva egy lépésben felépíthető a filamentum. A 4.4.a) ábrán látható egy tipikus formázási folyamat az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ mintára. A formázás előtt először határfelület jellegű kapcsolási módban karakterizáljuk a memrisztort (világoszöld), majd egy nagy soros ellenállás ($330 - 470 \text{ k}\Omega$) bekötése mellett megkezdjük a formázáshoz szükséges feszültséghangolást (piros görbe). Itt látszik, hogy eleinte a határfelületi kapcsolásra jellemző $I(V)$ görbét követi az áram, azonban a negatív feszültséget tovább csökkentve hirtelen lecsökken az ellenállás, ezzel megnő a min-tán folyó áram. A memrisztor ekkor bekerült egy több nagyságrenddel kisebb ellenállásba,

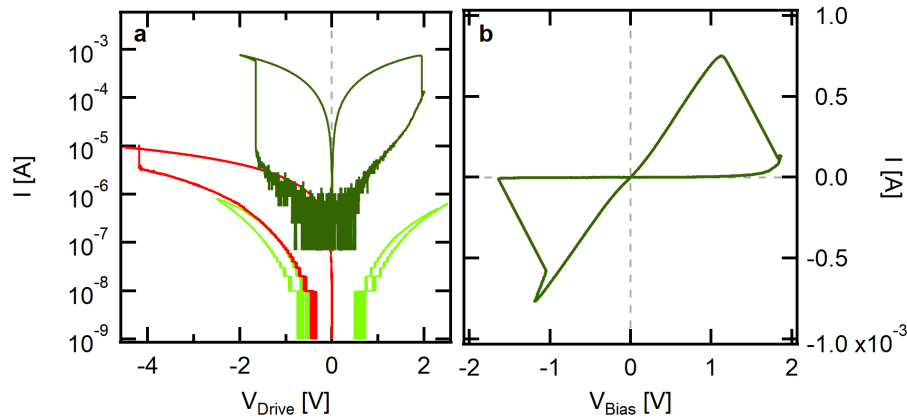
így a feszültség levétele során gyakorlatilag az áramkorlátozó ellenállásnak megfelelő áramot mérjük, azonban a soros ellenállás kisebbre csökkentése (tipikusan $1\text{ k}\Omega$) után a memrisztor $I(V)$ karakterisztikája újra felbontható és ideális esetben filamentáris módban működik, amit a sötétzöld görbék mutatnak a 4.4.a) ábrán logaritmikus-lineáris, a 4.4.b) ábrán lineáris-lineáris skálán. Utóbbin látható, hogy a filamentáris mód hasonló $I(V)$ karakterisztikát mutat, mint az AgSn memrisztor esetén.

A módszer egyszerűnek tűnik, azonban tapasztalataim szerint a formázási folyamat a valóságban jellemzően nehezkesebb. Méréseim során körülbelül 10 minta esetén próbálkoztam a formázással különböző soros ellenállások, feszültséghangolási ráta alkalmazása mellett. A formázott minták mind bekerültek egy kis ellenállású ($< 1\text{ k}\Omega$) állapotba, azaz vélhetően felépült a filamentum, azonban amikor a [20] publikációban is alkalmazott $1 - 2\text{ V}$ feszültséggel megpróbáltam kikapcsolni őket, ez jellemzően nem sikerült. Nagyobb feszültség alkalmazásával sikerült a kikapcsolás, azonban ekkor jellemzően egy nagyon nagy ellenállású állapotba ragadtak, amiből már nem lehetett bekapcsolást végre hajtani, valószínűleg ekkor a nagy feszültség/áram hatására a minta károsodott és megtörtént a teljes elszakadása.

Összesen három esetben sikerült a formázást olyan módon végrehajtani, hogy a memrisztor utána filamentáris módban ki- bekapcsolható volt, azonban ebből két esetben néhány kapcsolás után mégis beragadt a minta egy kis ellenállású állapotba, amiből végül csak nagy feszültség alkalmazásával sikerült kikapcsolni, de ekkor ezek a minták is tönkrementek. Egy esetben viszont el tudtam érni, hogy a rendszer stabilan az AgSn memrisztorok esetén megfigyelt kapcsolási görbékhez hasonló szép filamentáris kapcsolási görbéket mutasson. Végül ezen az egyetlen memrisztoron volt annyira stabil a kapcsolat, hogy zajt is mérhessek rajta filamentáris módban.

Ezek a tapasztalatok azt mutatják, hogy a módszer, amit a jülichi kollégák használtak, nekem nem vált be, kihozatala jelentősen rosszabbnak bizonyult. Ennek pontos okát sajnos nem sikerült kideríteni, az eltérő viselkedést esetleg okozhatja az eszközök különbözősége. Egy jelentős eltérés a jülichi kísérleti technika és az általam használt technika között, hogy ők egy olyan berendezéssel (Agilent B1500A félvezető paraméter analízátor) mértek, melyen beállítható egy kívánt áramkorlátozás, míg én ezt egy sorosellenállás alkalmazásával tudtam csak elérni. A maximális áram mindkét esetben korlátozásra kerül, azonban a filamentum kialakulása után a feszültség lekapcsolása alatt az $I(V)$ karakterisztikák eltérnek, ez esetleg befolyásolhatja a filamentum finomszerkezetének kialakulását. Ezen okok miatt szeretnék a későbbiekben olyan formázási eljárást kikísérletezni, amivel a laborunkban is nagy kihozattalal elő tudunk állítani

filamentáris módban működő $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ kapcsolókat. Például szeretnék kipróbálni olyan formázási folyamatot is, ami hasonló az AgSn memrisztorokon alkalmazotthoz, azaz több cikluson keresztül építi fel a filamentumot. Ez remélhetőleg meg tudja oldani az eddig felmerült problémákat.

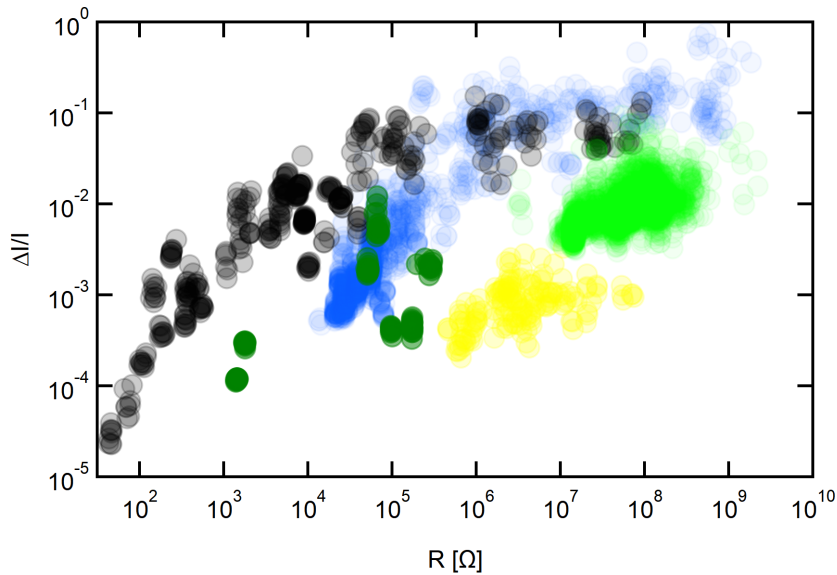


4.4. ábra. a) Formázás lépéseinek bemutatása: világoszölddel a határfelület jellegű kapcsolási karakterisztika a formázás előtt, pirossal a formázás alatt mért áram, sötétzölddel a formázás után mért karakterisztika, mely filamentáris kapcsolást mutat. b) Az a) panelen ábrázolt filamentáris kapcsolás $I(V)$ görbéje a mintán eső feszültség ($V_{\text{Bias}} = V_{\text{Drive}} - I \cdot R_{\text{soros}}$) függvényében lineáris-lineáris skálán.

4.3. Relatív zaj ellenállásfüggésének összehasonlítása különböző memrisztorokra

4.5. ábrán látható a csoportunk által és általam mért memrisztorok relatív áramfluktuációja az ellenállás függvényében. Az ábrán a feketével szerepelnek az AgSn memrisztorokon (melyek tartalmazzák a saját méréseimet is), sötétzölddel az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ felületi módjában, világoszölddel pedig a $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ filamentáris módjában mért eredmények. Referenciaként a SiO_x fázisváltáson alapuló memrisztorok relatív zaja (kék) [33, 34, 3] és a $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ -alapú (továbbiakban PCMO) memrisztorokon (sárga) végzett mérések eredményei is feltüntetésre kerültek az ábrán [35]. Előbbi rendszerek (SiO_x) ún. fázisváltó memóriák, amikben egy néhány nanométeres grafén nanorész definiálja a kapcsoló tartományt, melyben a SiO_x mátrixnak két állapota van: amorf és kristályos. Az amorf fázis feleltethető meg a rosszul vezető kikapcsolt állapotnak, míg a kristályos fázis a bekapcsolt állapotnak. A vezetési mechanizmusok pontosan még nem meghatározottak, de az amorf fázisban tapasztalt karakterisztika jól leírható alagút jel-

legű vezetéssel. Utóbbi rendszer (PCMO) pedig azért érdekes, mert ez is határfelületi kapcsolás jelleggel működik mint az általam vizsgált $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$, azonban ezeknek a memrisztoroknak a mérete $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ -től $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ -ig terjed, azaz keresztmetszetük 2-4 nagyságrenddel nagyobb [18, 19].



4.5. ábra. A relatív áramfluktuáció-ellenállás grafikon $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -ra, világoszölddel határfelületi típus kapcsolás relatív zaja, sötétzölddel a megformázott, filamentáris állapot relatív zaja. Referenciaként feketével az AgSn relatív zaj adatai. Valamint késsel a SiO_x fázisváltozáson alapuló memrisztorok relatív zaja a [3] cikkből, illetve sárgával PCMO-alapú rendszer zaja [35].

A különböző memrisztorok zajának összehasonlítása szempontjából a legrelevánsabb ellenállástartomány a körülbelül $1\text{M}\Omega$ - $1\text{G}\Omega$ közötti tartomány. Jól látható, hogy az AgSn és SiO_x memrisztorok nagy ellenállású állapotai, az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú minta határfelületi módjának állapotai, valamint a PCMO minta állapotai esnek ide. Az AgSn és SiO_x rendszerek hasonló szintű és ellenállástól független relatív zajt mutatnak ebben a tartományban, míg az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ memrisztorok relatív zaja ettől 1-2 nagyságrenddel kisebbnek tűnik, amitől a PCMO rendszer relatív zajszintje további körülbelül 1 nagyságrenddel alacsonyabb. Továbbá utóbbi két rendszer esetén egy enyhe ellenállásfüggést is megfigyelhetünk.

Feltűnik, hogy a kisebb, nanométeres, karakterisztikus méretű eszközök (AgSn, SiO_x) nagyobb relatív zajt mutatnak, mint a nagyobb karakterisztikus méretű (néhány 100nm és néhány $10\mu\text{m}$) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ és PCMO memrisztorok. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a relatív zajszint a karakterisztikus mérettel fordítottan arányos, ami egyezik a tömbi mintákra érvényes empirikus Hooge-törvény megfigyeléseivel [2, 36], így mondhatjuk, hogy az elvártaknak

megfelelő viselkedés. Azonban a memrisztív rendszereknél nem szabad elfelejteni, hogy a nanométer méretskálájú eszközökben az aktív tartomány nagyon kis mérete miatt ezek a tömbi struktúrákra tett megfontolások nem maradéktalanul érvényesek, a relatív zaj nagyságának és ellenállásfüggésének jellemzésekor a különböző vezetési mechanizmusokat is figyelembe kell venni, illetve a dinamikus szórócentrumok mennyisége mellett az is sokkal jobban számít, hogy az egyes szórócentrumok mennyire esnek közel az eszköz aktív tartományához.

Érdekes még összevetni a filamentári módban működő memrisztorokat is, ahol szembevetendő viselkedés, hogy hasonló ellenállás-tartományban az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ filamentáris kapcsolónak a zaja sokkal kisebb relatív zajszintet ad mint az AgSn. Ez esetleg utalhat arra, hogy ebben a rendszerben alacsonyabb a dinamikus szórócentrumok sűrűsége, vagy az egy-egy szórócentrum által okozott ellenállás-változás, de ahogy csoportunk [9] publikációjában is látható, akár az elektronok rövid átlagos szabadúthosszának köszönhető zajelnyomás is okozhatja. Ahogy az előző fejezetben is említettem, a formázási nehézségek miatt sajnos az csak kevés mérést tudtam elvégezni az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ filamentáris módja esetén, így az ellenállásfüggés vizsgálatára még nem adódott lehetőségem, de ezek a kezdeti eredmények ígéretesek és mutatják, hogy a rendszer vizsgálatát érdemes folytatni.

4.4. Kitekintés, további tervek

A méréseim alapvetően sikeresek voltak, de emellett több nehézséggel is szembesültem az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú memrisztorok esetén. Ilyen volt például az elektroformázás rendkívül alacsony kihozatala, valamint az, hogy a minták határfelületi jellegű kapcsolási módban a [20] publikációban közölttől némiképp eltérő viselkedést mutattak. Egyrészt az egy-egy minta esetén tapasztalt ki- és bekapcsolt állapotok ellenállásának aránya elmaradt a várt 5-ös faktortól, esetemben jellemzően 2 körül alakult. Továbbá azt is tapasztaltam, hogy azokban a mérésekben, melyekben több száz kapcsolást hajtottam végre határfelületi módban, az ellenállásarány a kapcsolások hatására tovább csökkent és a ki- és bekapcsolt állapotok közötti különbség a -500mV -os referencia feszültségnél teljesen el is tűnt és csak magasabb feszültségnél lehetett észlelni. Másrészt a határfelületi jellegű kapcsolási módban az ellenállások felülettől való függése sem teljesen a várakozásoknak megfelelően alakult. Az Ohm-törvény szerint a minták ellenállása a felülettel fordítottan arányos ($R \sim 1/A$) és a [20] publikációban valóban ezt is tapasztalták. A saját méréseimben viszont ettől gyengébb felületfüggést kaptam az ellenállás inkább a felület négyzetgyökével bizonyult fordítottan arányosnak. A relatív zaj pedig még et-

től is gyengébb felületfüggést mutatott. A tapasztalt eltérések oka még nem teljesen felderített, elképzelhető, hogy a minta degradálódott a szállítás, vagy egyszerűen a gyártástól eltelt idő (több, mint 1 év) miatt.

Terveim között szerepel, hogy folytassam a méréseket az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú rendszeren és kiküszöböljem az eltérő viselkedés okát. Egyrészt célom a mérési folyamat optimalizálása, másrészt pedig a jülichi kollégákkal már történtek egyeztetések újabb minták beszerzése érdekében, melyek hamarosan beérkeznek a laborunkba és ezeken is tervezem mérések elvégzését.

Tervezem továbbá az AgSn-alapú mintákon végzett mérések folytatását is, melyek keretében a teljes ellenállás-tartomány minél folytonosabb lefedését szeretném elvégezni, hogy így egyértelműen azonosíthatóak legyenek a relatív zaj ellenállásfüggésében megfigyelhető trendek.

A lineáris áram-feszültség karakterisztikájú mérések mellett mindkét mintán szertnék majd ún. nemlineáris zajspektroszkópiát is végezni [32, 1], melynek lényege, hogy magasabb feszültségek mellett is vizsgáljuk a zajt és így megfigyelhető, hogy a nemlineáris áram-feszültség karakterisztika hogyan transzformálódik nemlineáris zajkarakteristikává. Ezzel alaposabb képet kaphatunk a vizsgált memrisztorokban jellemző vezetési mechanizmusokról és zajforrásokról is [1, 32]. Továbbá így a mérések egészen a kapcsolási küszöbfeszültséghez közeli feszültségekre is kiterjeszthetők, melyek további elemzésekre adnak lehetőséget, mint például az ún. prekursor effektus, azaz a kapcsolat előtt megnövekvő relatív zaj.

5. Összefoglalás

Összegzésként megállapíthatom, hogy a fő célkitűzésemet elértem, sikeresen megismerkedtem a zajmérés technikájával, a mérési eredmények kiértékeléseinek módszereivel, a minták elektromos kikötésével. Mellette sikeresen megértettem az AgSn és $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú memrisztorok működésének elvi alapjait, valamint a gyakorlati kezelését is elsajátítottam az AgSn esetén szükséges viszonylag bonyolult a formázási folyamattal együtt. Ennek köszönhetően elértem, hogy már önállóan is képes vagyok méréseket végezni, ezzel aktívan hozzá tudok járulni a csoport munkájához és a majdani publikációkhoz.

A TDK munkám során sikeresen végeztem zajméréseket a két mintán olyan számban, hogy a kapott eredményeket egymással és a csoportunk által vizsgált egyéb minták eredményeivel is össze tudtam vetni, és meg tudtam állapítani az egymáshoz képesti relatív zajszinteket, ahol

megfigyeltem a karakterisztikus mérettel való fordított arányosságot. Ezen kívül a(z) különböző (azonos) működési módok esetén a relatív zaj ellenállásfüggésének különböző (azonos) trendjeit is meg tudtam figyelni, ami megalapozza egyszerű elméleti modellek felállítását.

A munkám ezzel azonban nem ért véget, sőt csak most kezdődik igazán. Jövőbeli célom, hogy a további méréseket végezzek ezeken a mintákon. Az AgSn mintán fő célom a teljes ellenállástartomány lefedése annak érdekében, hogy teljes képet kaphassunk a memrisztor zajának ellenállásfüggéséről. Az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -alapú memrisztornál mind határfelületi, mind filamentáris kapcsolási módban szintén ez lenne a cél. Ugyanakkor ennél memrisztornál utóbbi esetben előbb szükséges a megfelelő formázás elsajátítása, esetleg új formázás kidolgozása, amivel elérhető, hogy stabilan filamentáris kapcsolást tudjunk biztosítani. A határfelületi módban pedig az alapterület (minta mérete) és relatív zaj közötti összefüggés elemzése is érdekes lehet.

6. Köszönetnyilvánítás

Végezetül szeretném megköszönni témavezetőmnek Dr. Balogh Zoltánnak, hogy megtanította a zajmérések alapjait, jelentős segítséget nyújtott a dolgozatban megjelenő ábrák elkészítésében, és hogy átnézte a dolgozatomat, és felhívta a hibákra a figyelmem.

Továbbá köszönet illeti Dr. Halbritter Andrást is, aki biztosította a méréshez szükséges eszközöket és laboratóriumot, valamint megteremtette a nemzetközi kapcsolatokat, melyeknek köszönhetően hozzájutottunk az általam mért mintákhoz.

Köszönet jár Elias Passerininek és Horváth András Máténak az AgSn és a PCMO mintákon végzett mérésekért és azért, hogy az eredményeiket felhasználhattam a dolgozatban a saját eredményeimmel való összevetésre.

Balázs Péternek és Krisztián Dávidnak szintén köszönöm a SiO_2 mintán végzett méréseket és ezek eredményeit, amikkel az ábráimat ki tudtam egészíteni.

Felix Cüppersnek köszönöttem tartozom az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_x$ -hoz adott hasznos instrukciók miatt.

Sánta Botondnak köszönöm a PhD értekezését, amiből sok hasznos információt tudtam meg a zajmérésekről és a rezisztív kapcsoló rendszerekről, valamint inspirációt tudtam meríteni. Külön köszönöm, hogy bizonyos az ábrákat át tudtam venni a munkám háttérének bemutatásához.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm Susanne Hoffmann-Eifert (Forschungszentrum Jülich kutatóintézet) és Jürg Leuthold csoportjának (ETH Zürich) hogy rendelkezésemre bocsájtották a vizsgált mintákat, amiken méréseket tudtam végezni.

Hivatkozások

- [1] Z. Balogh, G. Mezei, L. Pósa, B. Sánta, A. Magyarkuti, and A. Halbritter. *I/f noise spectroscopy and noise tailoring of nanoelectronic devices*. Nano Futures, **5**, 042002 (2021).
- [2] S. Kogan. *Electronic Noise and Fluctuations in Solids*. Cambridge University Press, New York (1996).
- [3] J. G. Fehérvári, Z. Balogh, T. N. Török, and A. Halbritter. *Noise tailoring, noise annealing, and external perturbation injection strategies in memristive Hopfield neural networks*. APL Machine Learning, **2**, 016107 (2024).
- [4] F. Cai, S. Kumar, T. Van Vaerenbergh, X. Sheng, R. Liu, C. Li, Z. Liu, M. Foltin, S. Yu, Q. Xia, J. J. Yang, R. Beausoleil, W. D. Lu, and J. P. Strachan. *Power-efficient combinatorial optimization using intrinsic noise in memristor Hopfield neural networks*. Nature Electronics, **3**, 409 (2020).
- [5] P. Mannocci, M. Farronato, N. Lepri, L. Cattaneo, A. Glukhov, Z. Sun, and D. Ielmini. *In-memory computing with emerging memory devices: Status and outlook*. APL Machine Learning, **1**, 010902 (2023).
- [6] A. Mehonic, A. Sebastian, B. Rajendran, O. Simeone, E. Vasilaki, and A. J. Kenyon. *Memristors—From In-Memory Computing, Deep Learning Acceleration, and Spiking Neural Networks to the Future of Neuromorphic and Bio-Inspired Computing*. Advanced Intelligent Systems, **2**, 2000085 (2020).
- [7] M.-K. Song, J.-H. Kang, X. Zhang, W. Ji, A. Ascoli, I. Messaris, A. S. Demirkol, B. Dong, S. Aggarwal, W. Wan, S.-M. Hong, S. G. Cardwell, I. Boybat, J.-S. Seo, J.-S. Lee, M. Lanza, H. Yeon, M. Onen, J. Li, B. Yildiz, J. A. del Alamo, S. Kim, S. Choi, G. Milano, C. Ricciardi, L. Alff, Y. Chai, Z. Wang, H. Bhaskaran, M. C. Hersam, D. Strukov, H.-S. P. Wong, I. Valov, B. Gao, H. Wu, R. Tetzlaff, A. Sebastian, W. Lu, L. Chua, J. J. Yang, and J. Kim. *Recent Advances and Future Prospects for Memristive Materials, Devices, and Systems*. ACS Nano, **17**, 11994 (2023).
- [8] S. Slesazeck and T. Mikolajick. *Nanoscale resistive switching memory devices: a review*. Nanotechnology, **30**, 352003 (2019).

- [9] B. Sánta, Z. Balogh, L. Pósa, D. Krisztián, T. N. Török, D. Molnár, C. Sinkó, R. Hauert, M. Csontos, and A. Halbritter. *Noise Tailoring in Memristive Filaments*. ACS Applied Materials & Interfaces, **13**, 7453 (2021). PMID: 33533590.
- [10] D. O. Filatov, D. V. Vrzheschch, O. V. Tabakov, A. S. Novikov, A. I. Belov, I. N. Antonov, V. V. Sharkov, M. N. Koryazhkina, A. N. Mikhaylov, O. N. Gorshkov, A. A. Dubkov, A. Carollo, and B. Spagnolo. *Noise-induced resistive switching in a memristor based on $ZrO_2(Y)/Ta_2O_5$ stack*. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, **2019**, 124026 (2019).
- [11] D. Molnár, T. N. Török, B. Sánta, A. Gubicza, A. Magyarkuti, R. Hauert, G. Kiss, A. Halbritter, and M. Csontos. *In situ impedance matching in Nb/Nb₂O₅/PtIr memristive nano-junctions for ultra-fast neuromorphic operation*. Nanoscale, **10**, 19290 (2018).
- [12] A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, and G. Mihály. *Non-exponential resistive switching in Ag₂S memristors: a key to nanometer-scale non-volatile memory devices*. Nanoscale, **7**, 4394 (2015).
- [13] A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, and G. Mihály. *Resistive switching in metallic Ag₂S memristors due to a local overheating induced phase transition*. Nanoscale, **7**, 11248 (2015).
- [14] A. Gubicza, D. Z. Manrique, L. Pósa, C. J. Lambert, G. Mihály, M. Csontos, and A. Halbritter. *Asymmetry-induced resistive switching in Ag-Ag₂S-Ag memristors enabling a simplified atomic-scale memory design*. Sci. Rep., **6** (2016).
- [15] A. Chanthbouala, V. Garcia, R. O. Cherifi, K. Bouzehouane, S. Fusil, X. Moya, S. Xavier, H. Yamada, C. Deranlot, N. D. Mathur, M. Bibes, A. Barthélémy, and J. Grollier. *A ferroelectric memristor*. Nature Materials, **11**, 860 (2012).
- [16] S. S. Teja Nibhanupudi, A. Roy, D. Veksler, M. Coupin, K. C. Matthews, M. Disiena, Ansh, J. V. Singh, I. R. Gearba-Dolocan, J. Warner, J. P. Kulkarni, G. Bersuker, and S. K. Banerjee. *Ultra-fast switching memristors based on two-dimensional materials*. Nature Communications, **15**, 2334 (2024).
- [17] E. Passerini, M. Lewerenz, M. Csontos, N. Jimenez Olalla, K. Keller, J. Aeschlimann, F. Xie, A. Emboras, X. Zhang, M. Fischer, Y. Fedoryshyn, M. Luisier, T. Schimmel,

- U. Koch, and J. Leuthold. *Controlling Volatility and Nonvolatility of Memristive Devices by Sn Alloying*. ACS Applied Electronic Materials, **5**, 6842 (2023).
- [18] A. Gutsche, S. Siegel, J. Zhang, S. Hambsch, and R. Dittmann. *Exploring Area-Dependent Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃-Based Memristive Devices as Synapses in Spiking and Artificial Neural Networks*. Frontiers in Neuroscience, **15** (2021).
- [19] A. Gutsche, S. Hambsch, N. C. Branca, R. Dittmann, S. Scholz, and J. Knoch. *Disentangling ionic and electronic contributions to the switching dynamics of memristive Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃/Al devices by employing a two-resistor model*. Phys. Rev. Mater., **6**, 095002 (2022).
- [20] S. Aussen, F. Cüppers, C. Funck, J. Jo, S. Werner, C. Pratsch, S. Menzel, R. Dittmann, R. Dunin-Borkowski, R. Waser, and S. Hoffmann-Eifert. *Correlation between Electronic Structure, Microstructure, and Switching Mode in Valence Change Mechanism Al₂O₃/TiO_x-Based Memristive Devices*. Advanced Electronic Materials, **9**, 2300520 (2023).
- [21] L. Pósa, P. Hornung, T. N. Török, S. W. Schmid, S. Arjmandabasi, G. Molnár, Z. Baji, G. Dražić, A. Halbritter, and J. Volk. *Interplay of Thermal and Electronic Effects in the Mott Transition of Nanosized VO₂ Phase Change Memory Devices*. ACS Appl. Nano Mater., **6**, 9137 (2023).
- [22] S. W. Schmid, L. Pósa, T. N. Török, B. Sánta, Z. Pollner, G. Molnár, Y. Horst, J. Volk, J. Leuthold, A. Halbritter, and M. Csontos. *Picosecond Femtojoule Resistive Switching in Nanoscale VO₂ Memristors*. ACS Nano, **18**, 21966 (2024).
- [23] L. Posa, M. Abbassi, P. Makk, B. Santa, C. Nef, M. Csontos, M. Calame, and A. Halbritter. *Multiple physical timescales and dead time rule in few-nm sized graphene-SiO_x-graphene memristors*. Nano Letters, **17**, 6783 (2017).
- [24] L. Pósa. *Resistive switching in ultrasmall nanogap devices*. Phd értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2019).
- [25] T. N. Török, J. G. Fehérvári, G. Mészáros, L. Pósa, and A. Halbritter. *Tunable, Nucleation-Driven Stochasticity in Nanoscale Silicon Oxide Resistive Switching Memory Devices*. ACS Applied Nano Materials, **5**, 6691 (2022).

- [26] F. Zahoor, T. Z. Azni Zulkifli, and F. A. Khanday. *Resistive Random Access Memory (RRAM): an Overview of Materials, Switching Mechanism, Performance, Multilevel Cell (mlc) Storage, Modeling, and Applications*. Nanoscale Research Letters, **15**, 90 (2020).
- [27] J. J. Yang, M.-X. Zhang, J. P. Strachan, F. Miao, M. D. Pickett, R. D. Kelley, G. Medeiros-Ribeiro, and R. S. Williams. *High switching endurance in TaOx memristive devices*. Applied Physics Letters, **97**, 232102 (2010).
- [28] Y. Xiao, B. Jiang, Z. Zhang, S. Ke, Y. Jin, X. Wen, and C. Ye. *A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects*. Sci. Technol. Adv. Mater., **24**, 2162323 (2023).
- [29] L. O. Chua, R. Tetzlaff, and A. Slavova. *Memristor Computing Systems*. Springer, Berlin, Germany (2021).
- [30] B. Sánta, Z. Balogh, A. Gubicza, L. Pósa, D. Krisztián, G. Mihály, M. Csontos, and A. Halbritter. *Universal 1/f type current noise of Ag filaments in redox-based memristive nanojunctions*. Nanoscale, **11**, 4719 (2019).
- [31] S. Botond. *Rezisztív kapcsoló memóriák dinamikai vizsgálata*. Ph.D. thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2021).
- [32] L. Pósa, Z. Balogh, D. Krisztián, P. Balázs, B. Sánta, R. Furrer, M. Csontos, and A. Halbritter. *Noise diagnostics of graphene interconnects for atomic-scale electronics*. npj 2D Materials and Applications, **5**, 57 (2021).
- [33] D. Krisztián. *Zajmérés grafén-SiO_x rendszeren*. Master's thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2019).
- [34] P. Balázs. *SiO_x fázisváltó memóriák zajjelenségeinek és hőmérsékletfüggő transzportjelenségeinek vizsgálata*. MSc thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2021).
- [35] A. M. Horváth. *Geometry-dependent fluctuations in memristive devices: a comparative noise analysis of area-dependent and filamentary resistive switching systems*. In ICNCE-2024 Conference (2024).
- [36] F. Hooge. *1/f noise is no surface effect*. Physics Letters A, **29**, 139 (1969).