MŰEGYETEM 1782

Rezisztív kapcsoló memóriák dinamikai vizsgálata

PhD Tézisfüzet

Sánta Botond

Témavezető: Dr. Halbritter András

Fizika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest, 2021

Kutatások előzménye

Moore-törvény által leírt több mint ötven éve tartó exponeciális technológia fejlődés végállomását az 5 nm-es kapuhosszal rendelkező MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) eszközök jelenthetik [1]. A további méretcsökkentés fizikai korlátjain túl komoly kihívást jelent az energiafogyasztás csökkentése is [2]. Egy harmadik, nagy problémakör a Neumann-architektúrából származik, amelyben a memória és processzor szétválasztása miatt a két egység közti nagy mennyiségű adatátvitel sebessége limitálja a rendszer hatékonyságát.

Az úgynevezett memrisztorok alkalmazása egyfelől képes lehet áthidalni az előbb felsorolt nehézségeket, másfelől speciális tulajdonságainak köszönhetően bizonyos feladatok esetén új implementációs lehetőségeket teremt a számítástechnikában.

Memrisztor alatt általánosan olyan kétpólusú, passzív áramköri elemet értünk, melynek ellenállása a memrisztorra adott feszültség segítségével nemillékony módon hangolható [3]. A gyakorlatban egy ilyen eszköz két, jól meghatározott ellenállású állapot (R_{BE} és R_{KI}) között kapcsol, ezért rezisztív kapcsolónak is nevezik. A gerjesztőjel amplitúdójával és hosszával a rendszer állapotai tetszőlegesen, folytonos léptékben állíthatóak; a memrisztor ezen tulajdonságát nevezzük analóg hangolhatóságnak.

Ennek köszönhető, hogy a rezisztív kapcsoló analóg memóriaként viselkedik, lehetővé téve a bináris adattároláson túlmutató, többszintes (*multilevel*) memóriatárolást. A memrisztoralapú, úgynevezett RRAM (*Resistive Random Access Memory*) eszközök technológiai paramétereit összehasonlítva a mai *flash* technológiával az aktív mérettartomány csökkenése mellett nagyobb adatsebesség, kisebb fogyasztás, jobb megbízhatóság és akár egy nagyságrenddel megnövelt élettartam jellemzi [4]. Az analóg hangolhatóság miatt a memrisztor nagyon hasonlóan viselkedik a szinapszisokhoz, így hatékony hardveres neurális hálózatokat építhetünk fel belőlük [5, 6]. Mindezek mellett memrisztorokból, mint alapvető építőelemekből akár logikai kapukat is fel tudunk építeni számos elrendezésben [7]. Ötvözve ezt a tulajdonságot az adattárolással, a Neumann-architektúrán túlmutató, közvetlenül a memóriában műveleteket végrehajtó eszközökhöz jutunk (*in-memory computing*) [8].

Mindezek fényében nem meglepő, hogy a memrisztorok kutatásával ma már olyan óriás technológiai vállalatok foglalkoznak, mint az IBM, a Western Digital vagy a Samsung. Jóllehet, az ipari alkalmazásuk már a küszöbön áll, a memrisztorok pontos belső fizikai működése sok anyag esetén még nem teljes

mértékben tisztázott, és így a későbbi alkalmazás és optimalizáció szempontjából létfontosságú azok alapkutatásbeli feltárása.

A rezisztív kapcsoláson alapuló eszközök alkalmazásai szempontjából lényeges a megvalósított eszközök sebessége. Habár a rezisztív kapcsoláshoz szükséges lehető legrövidebb idő elméletben mindössze néhány pikoszekundumos nagyságrendű, a gyakorlatban elért kapcsolási sebességet az alkalmazott mérőrendszer korlátozza [9]. Ennek köszönhető, hogy míg néhányszor tíz nanoszekundumos időskáláig a memrisztorkapcsolás lehetősége különböző anyagcsaládokra széles körben igazolt [10], addig nanoszekundumnál gyorsabb kapcsolást csak néhány esetben sikerült kimutatni [11–13].

Pár évvel ezelőtt a kutatócsoportunk is tanulmányozta a memrisztorok sebességi korlátait. Geresdi és munkatársai reprodukáló rezisztív kapcsolást tudtak létrehozni Ag_2S memrisztorban 10 ns-os impulzusokkal [14]. Később Gubicza Ágnes segítségével egy speciális, szubnanoszekundumos jelgenerátorral és a nagyfrekvenciás jelterjedés szempontjából optimalizált mérőrendszerrel tizenötször gyorsabb kapcsolást is sikerült eszközölniük [15]. A méréstechnikai elrendezésből adódóan azonban repetitív, egymást követő kapcsolások mérésére nem volt lehetőség.
Kutatócsoportunk a későbbiekben a korábbi méréstechnika továbbfejlesztésével repetitív, szubnanoszekundumos memrisztorkapcsolás tanulmányozását célozta meg. A doktori munkám során ennek a fejlesztésébe kapcsolódtam be. A kialakított nagyfrekvenciás mérőrendszerrel elsőként $PtIr/Nb_2O_5/Nb$ tanulmányozását végeztük, mellyel sikeresen valósítottunk meg több ezer, egymást követő ultragyors kapcsolást [S1]. A méréstechnika lehetővé tette, hogy akár a kapcsoló impulzus alatt bekövetkező változásokat is nyomon kövessük, azonban a Nb_2O_5 erősen nemlineáris viselkedése ezt megakadályozta. A mérési módszerben rejlő potenciál kiaknázásához egy lineáris áram-feszültség karakterisztikájú rendszerre volt szükség, így került előtérbe az AgI memrisztor nagyfrekvenciás vizsgálata, melyet már önállóan végeztem [S2].

A rezisztív kapcsolást mutató rendszerek belső dinamikájának feltárására kiváló módszer a zajspektroszkópia, ahogyan azt a szakirodalomban fellelhető számtalan tanulmány is alátámasztja [16–19]. Tradicionálisan a zajmérések fő motivációját a vizsgált rendszer zajforrásainak megismerése és a zavaró zajszint technikailag lehetséges legalacsonyabb szintre való csökkentése adja. Ezzel szemben manapság előtérbe került, hogy a zajra mint értékes erőforrásra tekintsünk, elősegítve a probabilisztikus optimalizáláson alapuló, hatékony hardveres neurális hálózatok kialakítását [6, 20]. Ehhez inkább a zajszint testreszabása, semmint eliminációja szükséges.

A kutatócsoportunk Ag_2S-alapú rezisztív kapcsolók tanulmányozása során egy feszültségzajmérésre alkalmas mérőrendszer fejlesztésébe kezdett. Doktori munkám során ennek a továbbfejlesztésében vettem részt azzal a céllal, hogy különféle ezüstalapú memrisztorok zajviszonyait vizsgáljam [S3]. Az ezüstalapú memrisztorok mellett kutatócsoportunk behatóan tanulmányozta átmenetifémoxid-alapú rezisztív kapcsolók tulajdonságait is [S1, 21]. Mivel az ezüstrendszerek zajméréséhez használt mérőrendszer több szempontból sem volt optimális, az oxidalapú rendszerek zajviszonyainak feltárására egy új, időfelbontásos áramzajmérésen alapuló módszert fejlesztettünk ki [22]. Ennek segítségével lehetőségem nyílt az ezüst- és átmentifémoxid-alapú memrisztorok zajviszonyainak komplex összehasonlítására [S4].

Célkitűzések

Doktori munkám során memrisztorok vizsgálatával foglalkoztam két, jól elkülöníthető témakörben. Kutatómunkám első felében ultragyors memrisztorkapcsolás tanulmányázását végeztem. Ehhez először pontkontaktusos PtIr/AgI/Ag memrisztor kialakítását és alacsony frekvenciás karakterizálását céloztam meg. A mérési eredményeket felhasználva megállapítottam, hogy a kialakított AgI mintákkal potenciálisan megvalósítható lehet a szubnanoszekundumos rezisztív kapcsolás, amennyiben ehhez egy megfelelő nagyfrekvenciás mérőrendszer is rendelkezésre áll.

A második célom egy ultragyors memrisztorkapcsolás vizsgálatára alkalmas nagyfrekvenciás mérőrendszer fejlesztése volt, amellyel a korábban vizsgált AgI-alapú rezisztív kapcsoló repetitív, szubnanoszekundumos kapcsolását tanulmányozhatom. A mérőrendszer fejlesztését Molnár Dániel MSc-hallgatóval közösen végeztem. Az én feladatom a kialakított mérőrendszer csillapításának karakterizálása, a mérőfej optimalizációja, valamint a PtIr/AgI/Ag rendszeren végzett nagyfrekvenciás mérések kivitelezése és azok elemzése volt.

Kutatómunkám másik nagy témaköre a memrisztorok zajmérésére irányult. A korábbi megfontolások alapján kijelenthetem, hogy a doktori munkámban elvégzett rezisztív kapcsolást mutató rendszerek zajvizsgálatának célja kettős: egyfelől a belső dinamika megismerése, az egyedi fluktuátorok vizsgálata, másfelől pedig a zaj nagyságának hangolása volt a célom. Ehhez kétféle, különböző kapcsolási mechanizmussal operáló anyagcsalád zajviszonyait tanulmányoztam: ezüstalapú és átmenetifémoxid-alapú

memrisztorokét.

Elsőként különböző ezüstalapú rendszerek elektronikus zajviszonyainak vizsgálatával foglalkoztam. Ehhez a korábban rezisztív kapcsolás szempontjából részletesen karakterizált PtIr/Ag_2S/Ag rendszer zajmérésére koncentráltam, majd a doktori munkám során részletesen vizsgált PtIr/AgI/Ag rendszer zajviszonyait elemeztem. A memrisztorműködés során kialakított két, egymástól eltérő kémiai környezetben létrejött ezüstfilamentum elektronikus zajviszonyainak jó egyezése felvetette a kérdést: vajon a filamentum belsejében vagy annak környezetében lezajló fizikai/kémiai folyamatok dominálják az ezüstrendszerek zaját? A kérdés megválaszolására további két, eltérő módszerrel létrehozott, tisztán ezüstből felépülő nanostruktúrát hoztunk létre, majd az ezeken végzett zajmérések eredményeit összevetettem a rezisztív kapcsolókon mértekkel.

Az ezüstrendszerek részletes zajvizsgálatát követően a kutatócsoportunk által korábban vizsgált Nb_2O_5- és Ta_2O_5-alapú rezisztív kapcsolók zajviszonyainak feltárását és az ezüstrendszerekkel való összehasonlítását céloztam meg. Mivel a kétféle anyagcsalád egymástól merőben eltérő kapcsolási mechanizmussal operál, így az összehasonlítás célja a zajviszonyok eltérésének fizikai hátterének a meghatározása volt, mely végül elvezetett a zajszint tudatos beállításának lehetőségéhez.

Vizsgálati módszerek

A kutatásom során tanulmányozott különféle rezisztív kapcsolást mutató rendszereket javarészt pásztázó szondás méréstechnikával (STM-pontkontaktus) hoztam létre. Az egyes rendszerek áram-feszültség karakterisztikáit változtatható amplitúdójú és frekvenciájú háromszögjelekkel rögzítettem. Az AgI memrisztor ultragyors kapcsolását egy speciális, nagyfrekvenciás jelterjedésre optimalizált STM-mérőrendszerrel végeztem. A mérőrendszerben két, névlegesen 500 ps unipoláris jelgenerátorral valósítunk meg bipoláris memrisztorkapcsolást.

Az ezüstalapú rendszerek zajmérését keresztkorrelációs feszültségzajmérással, míg az átmenetifémoxid-rendszerek zajviszonyait időfelbontásos áramzajmérési módszerrel vizsgáltam. A keresztkorrelációs méréstechnika alkalmazása optimális, amennyiben alacsony ellenállású ($< 300\ \Omega$) rendszerek zaját vizsgáljuk. Az időfelbontásos áramzajméréssel pedig a

teljes memrisztorkapcsolás zajviszonyai mérhetőek, így a kapcsolási küszöb környéke is.

A zajviszonyok elemzéséhez egy dinamikus szórócentrumokon alapuló zajmodellt használtam fel, melyet a témavezetőm korábbi, pontkontaktusokban található kétállapotú rendszereken (TLS = *Two Level System*) történő szórásról szóló összefoglaló cikke alapozott meg [23]. A modell lényege, hogy a relatív áramfluktuáció mértéke egy vékony filamentumban, a filamentum legszűkebb tartománynak átmérője vagy az ennek megfelelő ellenállás függvényében megbecsülhető, feltételezve, hogy a zajt a filamentumban található kétállapotú rendszerek, vagyis metastabil állapotok között mozgó atomok vagy atomcsoportok generálják. A fenti modell segítségével zajméréssel megbecsülhető a filamentumban lévő zajt generáló dinamikus szórócentrumok átlagos sűrűsége és diffúzív vezetésénél az elektronok szabadút-hossza.

Új tudományos eredmények

Tudományos eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze.

1. STM-pontkontaktusos méréstechnikával tanulmányoztam PtIr/AgI/Ag rendszerek reziszítív kapcsolását. Ehhez a mintakészítési eljárást optimalizálva állítottam elő ezüst-jodid vékonyrétegeket, melyek kémai összetételét és rétegszerkezetét RBS-méréstechnikával analizálták. Kutatásom során vizsgáltam a PtIr/AgI/Ag rendszer milliszekundumos impulzusokkal, valamint háromszögjelekkel megvalósított rezisztív kapcsolását. Az utóbbival öt nagyságrendet átfogó frekvenciasávban rögzítettem az AgI kapcsolási dinamikáját [S2]. Megmutattam, hogy az ezüst-jodid stabil, lineáris áram-feszültség karakterisztikával bír a kapcsolási küszöbig és analóg módon hangolható.

2. Részt vettem egy szubnanoszekundumos memrisztorkapcsolások kivitelezésére is alkalmas nagyfrekvenciás mérőrendszer fejlesztésében és megépítésében. A rendszer két, névlegesen 500 ps-os félértékszélességű unipoláris impulzusgenerátor felhasználásával állít elő bipoláris kapcsolást [S1]. A rendszerfejlesztés során részletesen vizsgáltam a mérőrendszer egyes elemeinek csillapítását és hatását a kapcsoló impulzusra. A rezisztív kapcsolás tanulmányozásához a vizsgált rendszer ellenállását,

illetve impedanciáját többféle módszerrel lehet monitorozni. Ezen módszerek használhatóságát sztenderd ellenállásokon végzett validáló mérésekkel demonstráltam. A kialakított nagyfrekvenciás mérőrendszerrel sikeresen valósítottam meg PtIr/AgI/Ag rendszer ultragyors, repetitív kapcsolását. Sztenderd ellenállásokon végzett összehasonlító mérésekkel megmutattam, hogy a beírás már a kapcsoló impulzus felfutó élénél, vagyis 500 ps-nál hamarabb bekövetkezik [S2].

3. STM-pontkontaktusos technikával kialakított PtIr/Ag_2S/Ag és PtIr/AgI/Ag rezisztív kapcsolók, valamint litográfiás módszerrel és mechanikai törőkontaktusos technikával létrehozott tiszta ezüstvezetékek keresztkorrelációs feszültségzajmérésével megmutattam, hogy a zaj-áram arány ellenállásfüggése nem függ az ezüstvezeték előállításának módjától, az univerzális viselkedést mutat [S3]. A litográfiás módszerrel kialakított ezüstminta esetében a kezdeti, két nagyságrenddel alacsonyabb zajszint az elektromigrációs elvékonyítás során a rendszerbe vitt hibahelyek és befűződések következtében drasztikusan megnő és konvergál a másik három rendszer $\Delta I/I$ értékeihez. A témavezetőm által javasolt, pontkontaktus-geometriát figyelembe vevő zajmodell alapján egy-egy diffúzív és ballisztikus vezetésű tartományt azonosítottam az Ag_2S memrisztor zaj-áram arányának ellenállásfüggését tanulmányozva [S3, S5].

4. A kutatócsoportunk által kifejlesztett időfelbontásos áramzajmérési módszerrel tanulmányoztam STM-pontkontaktusos PtIr/Nb_2O_5/Nb és PtIr/Ta_2O_5/Ta, valamint szálkereszt-geometriájú Nb_2O_5 rezisztív kapcsolók áramzaját és hasonlítottam össze a korábban mért ezüstrendszerek zajviszonyaival [S4]. Az ezüstrendszerekhez képest a mért zajspektrumokban az $1/f$-zaj mellett megjelenik egy markáns Lorentz-kontribúció is, melynek forrása a kontaktus szűk keretmetszetének környezetében lévő domináns fluktuátor spektrumtorzító hatása. Az ezüstrendszerek zajméréseiből meghatározott ballisztikus-diffúzív átmenet az átmenetifém-oxid rendszereknél is megjelenik.Az áramzajmérések eredményeit összehasonlítva az ezüstalapú rendszerekével megállapítottam, hogy az Nb_2O_5- és Ta_2O_5-alapú rezisztív kapcsolók zaj-áram aránya több mint egy nagyságrenddel kisebb az Ag_2S diffúzív vezetési tartományát nézve. Ezt a zajcsökkenést a dinamikus szórócentrumokon alapuló zajmodell alapján az oxidrendszerekben kialakuló fémes

filamentumban lévő elektronok átlagos szabadút-hosszának csökkenése, illetve a szórócentrumok átlagos távolságának növekedése okozza. Eredményeim alapján egy memrisztor zajszintje anyagválasztással, célzott anyagtudományi tervezéssel, valamint az ellenállás hangolásával testreszabható, elősegítve a hatékony, probabilisztikus optimalizáláson alapuló hardveres neurális hálózatok felépítését [S4, S5].

Az eredmények hasznosítása

Az ultragyors memrisztorkapcsolás vizsgálata során megmutattam, hogy a transzmittált-reflektált impulzusok arányának analízisével hogyan lehetne a rezisztív kapcsolás folyamatát követni az ultragyors kapcsoló impulzus időtartama alatt, amennyiben a mérőrendszer lényegesen nagyobb sávszélességgel rendelkezne.

Az ezüst- és átmenetifémoxid-alapú rendszerek zajviszonyaiban tapasztalható különbségek a dinamikus szórócentrumokon alapuló zajmodellünk szerint két fizikai mennyiségre vezethetőek vissza: az elektronok átlagos szabadút-hossza és a TLS-esek átlagos távolsága. A célul kitűzött zajtervezés megvalósítása így a gyakorlatban az lehet, hogy az eszköz tervezésénél adott anyagot vagy anyagcsaládot kiválasztva e két paramétert célzottan úgy manipuláljuk, hogy a kialakuló zajszintek adott alkalmazáshoz optimálisak legyenek. A rezisztív kapcsoló rendszereken végzett zajméréseim megmutatták, hogy a zajszint erősen függ a rendszer ellenállásától, így annak precíz beállításával a zajszint hangolhatóvá válik egy már meglévő eszközön belül. Mind a zajtervezés, mind a zajhangolás kulcsfontosságú abból a szempontból, hogy a zajt mint erőforrást hasznosítsuk, és hatékony, probabilisztikus optimalizáláson alapuló hardveres neurális hálózatokat valósítsunk meg [S5].

Tézispontokhoz kapcsolódó saját publikációk

[S1] D. Molnár, T. N. Török, B. Sánta, A. Gubicza, A. Magyarkuti, R. Hauert, G. Kiss, A. Halbritter, M. Csontos, In situ impedance matching in $Nb/Nb_2O_5/PtIr$ memristive nanojunctions for ultra-fast neuromorphic operation, Nanoscale **10**, 19290–19296 (2018).

[S2] B. Sánta, D. Molnár, P. Haiber, A. Gubicza, E. Szilágyi, Z. Zolnai, A. Halbritter, M. Csontos, Nanosecond resistive switching in Ag/AgI/PtIr nanojunctions, Beilstein Journal of Nanotechnology **11**, 92–100 (2020).

[S3] B. Sánta[1], Z. Balogh[1], A. Gubicza, L. Pósa, D. Krisztián, G. Mihály, M. Csontos, A. Halbritter, Universal $1/f$ type current noise of Ag filaments in redox-based memristive nanojunctions, Nanoscale **11**, 4719–4725 (2019).

[S4] B. Sánta, Z. Balogh, L. Pósa, D. Krisztián, T. N. Török, D. Molnár, C. Sinkó, R. Hauert, M. Csontos, A. Halbritter, Noise Tailoring in Memristive Filaments, ACS Applied Materials & Interfaces **13**, 7453–7460 (2021).

[S5] Z. Balogh, G. Mezei, L. Pósa, B. Sánta, A. Magyarkuti, A. Halbritter, 1/f noise spectroscopy and noise tailoring of nanoelectronic devices, (review paper), Nano Futures, `10.1088/2399-1984/ac14c8` (2021).

[1] A szerzők egyenlő arányban járultak hozzá a cikkhez

Tézispontokhoz nem kapcsolódó saját publikációk

[S6] L. Pósa, M. E. Abbassi, P. Makk, B. Sánta, C. Nef, M. Csontos, M. Calame, A. Halbritter, Multiple Physical Time Scales and Dead Time Rule in Few-Nanometers Sized Graphene SiO_x-Graphene Memristors, Nano Letters **17**, 6783–6789 (2017).

[S7] T. Baross, P. Bereczki, L. Jánosi, M. Palánkai, B. Sánta, G. Veres, Diffusion bonding experiments of 316L steels in a Gleeble 3800 thermomechanical simulator for investigation of non-destructive inspection methods, Fusion Engineering and Design **160**, 111768 (2020).

[S8] L. Pósa, Z. Balogh, D. Krisztián, P. Balázs, B. Sánta, R. Furrer, M. Csontos, A. Halbritter, Noise diagnostics of graphene interconnects for atomic-scale electronics, npj 2D Materials and Applications **5**, 57 (2021).

Irodalomjegyzék

[1] J. M. Shalf, R. Leland, Computing beyond Moore's Law, Computer **48**, 14–23 (2015).

[2] R. S. Williams, What's Next? [The end of Moore's law], Computing in Science & Engineering **19**, 7–13 (2017).

[3] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, R. S. Williams, The missing memristor found, Nature **453**, 80–83 (2008).

[4] F. Zahoor, T. Z. A. Zulkifli, 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).

[5] C. Li, M. Hu, Y. Li, H. Jiang, N. Ge, E. Montgomery, J. Zhang, W. Song, N. Dávila, C. E. Graves, Z. Li, J. P. Strachan, P. Lin, Z. Wang, M. Barnell, Q. Wu, R. S. Williams, J. J. Yang, Q. Xia, Analogue signal and image processing with large memristor crossbars, Nature Electronics **1**, 52–59 (2018).

[6] F. Cai, S. Kumar, T. V. Vaerenbergh, R. Liu, C. Li, S. Yu, Q. Xia, J. J. Yang, R. Beausoleil, W. Lu, J. P. Strachan, Harnessing Intrinsic Noise in Memristor Hopfield Neural Networks for Combinatorial Optimization, arXiv (2019).

[7] I. Vourkas, G. C. Sirakoulis, Emerging Memristor-Based Logic Circuit Design Approaches: A Review, IEEE Circuits and Systems Magazine **16**, 15–30 (2016).

[8] M. A. Zidan, J. P. Strachan, W. D. Lu, The future of electronics based on memristive systems, Nature Electronics **1**, 22–29 (2018).

[9] S. Menzel, M. von Witzleben, V. Havel, U. Böttger, The ultimate switching speed limit of redox-based resistive switching devices, Faraday Discussions **213**, 197–213 (2019).

[10] W. Chen, S. Tappertzhofen, H. J. Barnaby, M. N. Kozicki, SiO_2 based conductive bridging random access memory, Journal of Electroceramics **39**, 109–131 (2017).

[11] A. C. Torrezan, J. P. Strachan, G. Medeiros-Ribeiro, R. S. Williams, Sub-nanosecond switching of a tantalum oxide memristor, Nanotechnology **22**, 485203 (2011).

[12] B. J. Choi, A. C. Torrezan, K. J. Norris, F. Miao, J. P. Strachan, M.-X. Zhang, D. A. A. Ohlberg, N. P. Kobayashi, J. J. Yang, R. S. Williams, Electrical Performance and Scalability of Pt Dispersed SiO_2 Nanometallic Resistance Switch, Nano Letters **13**, 3213–3217 (2013).

[13] M. von Witzleben, T. Hennen, A. Kindsmüller, S. Menzel, R. Waser, U. Böttger, Study of the SET switching event of VCM-based memories on a picosecond timescale, Journal of Applied Physics **127**, 204501 (2020).

[14] A. Geresdi, M. Csontos, A. Gubicza, A. Halbritter, G. Mihály, A fast operation of nanometer-scale metallic memristors: highly transparent conductance channels in Ag_2S devices, Nanoscale **6**, 2613–2017 (2014).

[15] Ágnes Gubicza, Resistive switching phenomena in Ag_2S based nanojunctions, PhD Thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2016.

[16] M.-J. Lee, C. B. Lee, D. Lee, S. R. Lee, M. Chang, J. H. Hur, Y.-B. Kim, C.-J. Kim, D. H. Seo, S. Seo, U.-I. Chung, I.-K. Yoo, K. Kim, A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta_2O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structures, Nature Materials **10**, 625–630 (2011).

[17] S. Choi, J. Lee, S. Kim, W. D. Lu, Retention failure analysis of metal-oxide based resistive memory, Applied Physics Letters **105**, 113510 (2014).

[18] W. Yi, S. E. Savel'ev, G. Medeiros-Ribeiro, F. Miao, M.-X. Zhang, J. J. Yang, A. M. Bratkovsky, R. S. Williams, Quantized conductance coincides with state instability and excess noise in tantalum oxide memristors, Nature Communications **7**, 11142 (2016).

[19] E. Piros, M. Lonsky, S. Petzold, A. Zintler, S. Sharath, T. Vogel, N. Kaiser, R. Eilhardt, L. Molina-Luna, C. Wenger, J. Müller, L. Alff, Role of Oxygen Defects in Conductive-Filament Formation in Y_2O_3-Based Analog RRAM Devices as Revealed by Fluctuation Spectroscopy, Physical Review Applied **14**, 034029 (2020).

[20] W. A. Borders, A. Z. Pervaiz, S. Fukami, K. Y. Camsari, H. Ohno, S. Datta, Integer factorization using stochastic magnetic tunnel junctions, Nature **573**, 390–393 (2019).

[21] T. N. Török, M. Csontos, P. Makk, A. Halbritter, Breaking the Quantum PIN Code of Atomic Synapses, Nano Letters **20**, 1192–1200 (2020).

[22] Krisztián Dávid, Zajmérés SiO_x-grafén memrisztív rendszeren, diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2019.

[23] A. Halbritter, L. Borda, A. Zawadowski, Slow Two-Level Systems in Point Contacts, Advances in Physics **53**, 939–1010 (2004).