

Információfeldolgozás nanoskálájú memrisztív eszközökkel

Török Tímea Nóra^{1,2*}, Pósa László^{1,2}, Molnár Dániel^{1,3}, Fehérvári János Gergő¹,
Kövecs Roland¹, Balogh Zoltán¹, Volk János^{2,4}, Halbritter András^{1,3}

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Intézet, Fizika Tanszék, Budapest, Magyarország

²HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Budapest, Magyarország

³HUN-REN-BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

⁴Védelmi Innovációs Kutatóintézet, Budapest, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: torok.timea@ttk.bme.hu

Beérkezett: 2023. november 30.; elfogadva: 2024. január 16.

Összefoglalás

Napjainkra az információs technológiák fejlődése elérte azt a szintet, ahol a gyorsuló ütemben létrejövő adattömeg feldolgozásához már sok esetben elégtelenek a klasszikus, Neumann-elvek alapján működő számítógépek. A jelenség újszerű szoftveres megoldások, biológiai ihletésű algoritmusok, neurális hálózatok elterjedéséhez vezetett, ám ezek hatékony alkalmazásához teljesen új hardveres megoldások szükségesek. Jelen kézirat ilyen újszerű architektúrákhoz fejlesztett, Si-mikrochip-alapú memóriatulajdonsággal rendelkező nanoméretű áramkört elemek kísérleti eredményeit mutatja be, illetve azok egy-egy specifikus információfeldolgozási feladatra történő alkalmazhatóságával foglalkozik.

Kulcsszavak: memrisztor, rezisztív kapcsoló memória, peremhálózati információfeldolgozás

Information processing with nanoscale memristive devices

Tímea Nóra Török^{1,2}, László Pósa^{1,2}, Dániel Molnár^{1,3}, János Gergő Fehérvári¹,
Roland Kövecs¹, Zoltán Balogh^{1,3}, János Volk^{2,4}, András Halbritter^{1,3}

¹Budapest University of Technology and Economics, Institute of Physics, Department of Physics, Budapest, Hungary

²HUN-REN Centre for Energy Research, Institute of Technical Physics and Materials Science, Budapest, Hungary

³HUN-REN-BME Condensed Matter Research Group, Budapest, Hungary

⁴Defence Innovation Research Institute, Budapest, Hungary

Summary

Resistive switching memory devices, also known as memristors, are generally metal-insulator-metal nanostructures whose conductivity can be varied via electrical signals, enabling information storage in the value of the conductivity. Based on this property, memristive devices provide a promising platform for hardware-level encoding of large matrices. With a network of memristors, computationally intensive vector-matrix operations can be performed in a single step, considerably speeding up the operation of an artificial neural network (ANN). Memristors can also serve as real physical building blocks for biologically inspired algorithms through their neuromorphic properties. Via building simple circuits, such devices can be used to create oscillators or artificial neurons, which can be utilized for the implementation of oscillatory neural networks (ONN) or spiking neural networks (SNN). Another interesting feature of these memristive neuromorphic circuits is that they can be directly used for information processing tasks at the edge of a network. Memristors facilitate such edge computing applications which usually require energy-efficient operation and small size of the processor unit. Edge computing approaches have several advantages over centralized data processing from the aspect of security, e.g., significantly reducing time latency of sending large amounts of data to a central hub, and by processing sensitive data locally and independently of the central servers.

Present work focuses on the experimental investigation of purpose-built nanoscale memristive devices, revealing their physical processes. A superconducting spectroscopy measurement technique is developed for the non-destructive detection of atomic scale memristive filaments during device operation (Török et al. 2020; Török et al. 2023). In addition, the tunable stochasticity of the nucleation process is revealed by statistical studies of the set process in silicon oxide memristors (Török et al. 2022). This finding provides a basis for the physical realization of neural activation functions, stochastically firing neurons or energy-efficient true random number generation. Finally, the applicability of the investigated nanoscale memristive devices is illustrated through two examples. The concept of a neuromorphic, memristor-based auditory sensing unit is presented, leading towards medical application in a fully implantable cochlear implant. Last, the feasibility of a hardware-level stochastic optimization procedure is introduced (Fehérvári et al. 2023), based entirely on memristive elements, utilizing tunable noise characteristics of the devices (Sánta et al. 2021).

Keywords: memristor, resistive switching memory, edge computing

Előszó

A partnerek közötti kutatási együttműködés sikerének szükséges, de nem elégséges feltétele a vezetők közötti közös elhatározás, illetve a célok meghatározása. A kulcs mindig az a fiatal kutató, aki a tényleges kutatási munkát végzi, aki a projektet fő feladatának és egy valódi szellemi kihívásnak tekintheti. Jelen cikk első szerzője már a Kooperatív Doktori Program megkezdése előtt jelentős kutatási tapasztalattal rendelkezett, de az együttműködésnek, illetve a KDP programnak köszönhetően jelentős haladást ért el a magasabb technológiai érettségű (TRL szintű) eszközök megvalósítása felé. Az előrelépés egyik fő eleme a standard félvezetőgyártással kompatibilis – azaz nagy volumenű termelésre is alkalmas – mintakészítési eljárások kidolgozása volt a korábbi, tűszondás mikroszkóppal megvalósított egyedi átmenetek helyett. Szintén minőségi változást jelentett, hogy az előzőleg vizsgált memristív kapcsolókat sikerült valós célra optimalizálni, komplex áramkörökbe ágyazni. Török Tímea mindkét kutatásban aktívan részt vett, a másodikban egyértelműen vezető szerepet játszott.

Dr. Volk János
vállalati szakértő, laboratóriumvezető
HUN-REN EK MFA Nanoérzékelők Laboratórium

Török Tímea Nóra már egyetemi hallgatóként aktív kutatási tevékenységet végzett: három TDK-munkát készített, melyek alapján Gábor Dénes Tudományos Diákköri Ösztöndíjat nyert el. A kooperatív doktori program keretében is hasonló tudományos aktivitással folytatta munkáját, egy személyben szintetizálva a projekthez szükséges áramkörök és eszközök fejlesztését és gyártását, az önálló kutatási tevékenységet, fiatal hallgatók témavezetését, illetve az egyetemi és vállalati partnerek (BME Fizika Tanszék / ELKH EK MFA) közötti munka összehangolását. Kutatócsoportunk széles körben foglalkozik olyan memóriával rendelkező áramköri elemek (memriszorok) fizikai tulajdonságainak vizsgálatával, melyek ellenállása a rájuk adott feszültség segítségével hangolható. Újszerű mérés technikai és adatkiértékelési módszerek alkalmazásával Tímea jelentős eredményeket ért el ezen a téren, különös tekintettel a közel atomi méretű, hangolható transzmissziójú memristív elemek tulajdonságainak feltérképezésére. A KDP-projekt keretében Tímea

ezen kívül számos különböző funkcionalitással rendelkező, például mesterséges szinapszisként vagy mesterséges neuronként működő memristív eszköz megbízható gyártástechnológiáját dolgozta ki. Ez lehetővé teszi, hogy a memristív eszközöket chipre integrálva olyan újszerű, neuromorfikus áramköröket hozzunk létre, melyek komplex érzékelési és jelfeldolgozási feladatokra alkalmasak. Mindezen eredmények túlmutatnak az egyéni doktori kutatásokon: egy egész kutatócsoport tevékenysége lépett magasabb szintre a komplex memristív áramkörök rendelkezésre álló gyártástechnológiájának köszönhetően. Ebben a tanulmányban a fejlesztett memristív eszközök tulajdonságainak bemutatásán túl összefoglaljuk a KDP-program keretében kidolgozott újszerű mérés technikákat, és érzékelési/információfeldolgozási funkciókat.

Dr. Halbritter András
témavezető, tanszékvezető egyetemi tanár
BME Fizika Tanszék

Bevezetés

A memóriatulajdonsággal rendelkező ellenállások – az ún. rezisztív kapcsoló memóriák, vagy más néven memriszorok – általában olyan fém-szigetelő-fém kettős nanoméretű átmenetet tartalmazó eszközök, amelyek vezetőképességét az elektródáikra kapcsolt elektromos jelekkel lehet változtatni. Ezzel lehetőség nyílik információ tárolására az áramköri elemek (Yang–Strukov–Stewart 2013; Zidan–Strachan–Lu 2018). Az adatot zérus feszültség mellett is megőrző, ún. nem-illékony memriszorok jellemző tulajdonsága, hogy a rezisztív kapcsolási jelenség megfelelően megválasztott idejű és amplitúdójú kapcsoló feszültségelekkel többszintű (analóg) programozás is megvalósítható, míg kis jelszinten a vezetőképesség állandó marad. Így ezek a rezisztív kapcsoló memóriák ígéretes platformot szolgáltatnak például neurális hálózatok nagy méretű súlymátrixainak hardverszintű kódolására. Memriszorok hálózatával az egyébként nagy számításigényű vektor-mátrix szorzási műveletek egyetlen lépésben elvégezhetőek. Ennek köszönhetően a rezisztív kapcsoló memóriákkal megvalósított mesterséges neurális hálózat (ANN, artificial neural network)

nagyságrendekkel gyorsabb és energiahatékonyabb működést ígér a manapság szokásos grafikai processzor (GPU, graphics processing unit) alapú megoldáshoz képest (Ambrogio et al. 2018). Ezen túlmenően a fent említett különleges feszültség- és időfüggő dinamikai viselkedést is lehet hasznosítani, azaz például a memrisztorok egyetlen eszközre is jellemző hosszú és rövid távú memóriatulajdonsága alapja lehet időbeli mintázatok felismerésének (Moon et al. 2019). Ilyen módon a memrisztorok biológiai ihletésű számítási eljárások hardveres megvalósításához szolgálhatnak valódi, fizikai építőelemként.

A memrisztorok egy másik csoportjába azok az illékony memóriával rendelkező eszközök tartoznak, melyek a közvetlen előzményektől függetlenül zérus feszültség környékén mindig a nagy ellenállás-értékű kikapcsolt (OFF) állapotban vannak. Ezek a kapcsolók szintén hasznosíthatók mesterséges neurális hálózatokban. Egyszerű áramköröket építve ilyen eszközökből olyan oszcillátorok vagy mesterséges neuronok hozhatók létre (Yi et al. 2018), amelyek oszcillációs, illetve tüzelő neurális hálózatokban egyaránt alkalmazhatóak (ONN/SNN, oscillatory/spiking neural network) (Kumar et al. 2022). További érdekes tulajdonsága ezeknek az emberi agy által inspirált, ún. neuromorfikus áramköröknek, hogy közvetlenül a hálózat peremén használhatóak fel információfeldolgozási feladatokra (Wang et al. 2020). Erre egy példa az a megoldás, melyben a külvilággal érintkező szenzor kimeneti jelét alakítjuk olyan tüskék sorozatává, amelyben az információt a csúcsok időbeni gyakorisága, azaz a tüzelés frekvenciája kódolja (Yuan et al. 2022). Ezek a peremhálózatok minden olyan alkalmazásban jelentős szerephez juthatnak, ahol fontos a feldolgozóegység energiahatékony működése és kis mérete.

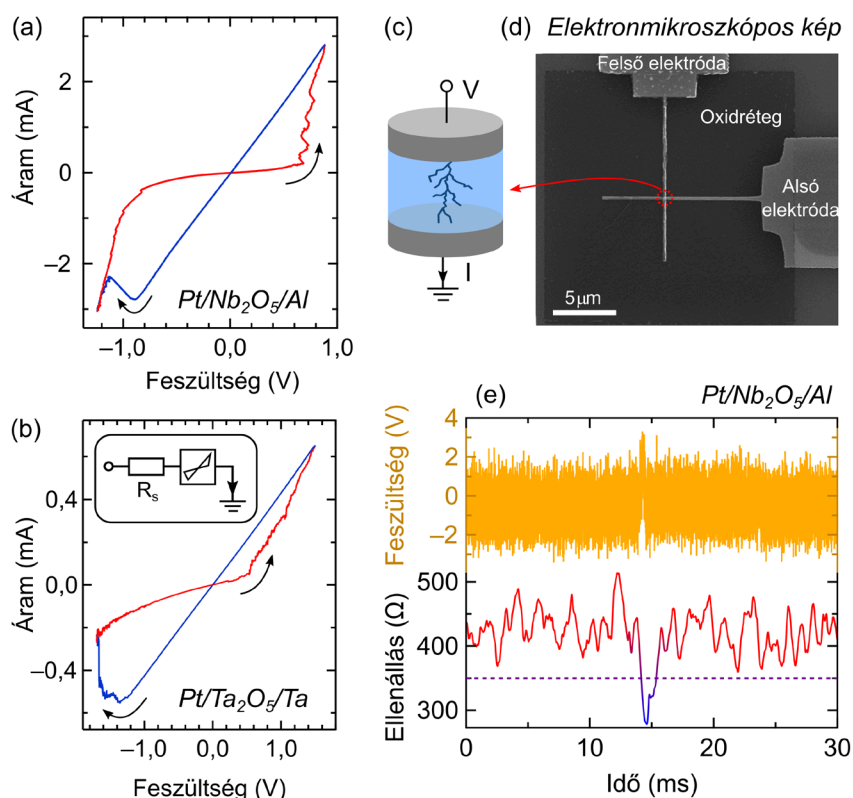
A peremhálózati feldolgozás az adatok keletkezési helyéhez közel történő információfeldolgozást jelenti, a központosított, felhőalapú infrastruktúrára támaszkodó adatprocesszállás helyett. Az előbbi megközelítés biztonsági szempontból számos előnnyel bír. A peremfeldolgozás egyfelől jelentősen csökkentheti a nagy mennyiségű adat központba történő továbbításával járó időkésleltetést, elősegítve ezzel a valós idejű döntéshozatalt és reagálást, ami kritikus helyzetekben különösen fontos lehet. Másik fontos előny, hogy ezzel a módszerrel fokozható a biztonság az érzékeny adatok lokális feldolgozása által, ami jelentősen csökkentheti az adatátvitel során fellépő, biztonsági résekkel kapcsolatos kockázatokat. További kiemelendő tulajdonság, hogy a peremhálózat lehetővé teszi az eszközök és alrendszerük önálló működését a központi szerverektől függetlenül, ami kulcsfontosságú lehet olyan esetekben, amikor a kommunikációs infrastruktúra használata nem lehetséges.

Jelen munka saját készítésű nanométeres méretű memrisztív kapcsolók kísérleti vizsgálatával foglalkozik. Az általunk fejlesztett különféle memrisztorok alapjelenéseinek bemutatása után a memrisztív működés megér-

tésére irányuló tanulmányokat ismertetjük. Ezek a munkák feltárják a vizsgált nanoskálájú eszközök fizikai működési folyamatait. Például az általunk alkalmazott Andrejev-spektroszkópiás méréstechnika alkalmas az aktív térfogatban kialakuló nanofilamentumok egyedi szerkezetének feltárására, illetve az atomi méretskálájú struktúrák *in-situ*, roncsolásmentes detektálására az eszköz működése közben (Török et al. 2020; Török et al. 2023). Emellett a vizsgált szilícium-oxid-alapú fázisváltó memóriák hangolható sztochaszticitása (Török et al. 2022) alapul szolgálhat akár neurális aktivációs függvények és sztochasztikusan tüzelő neuronok létrehozására, vagy pedig hasznosulhat valódi véletlenszám-generálási feladatok energiahatékony megvalósítására (Sebastian et al. 2020). Végül két példán keresztül kerül bemutatásra a vizsgált memrisztorok alkalmazhatósága: egy középfülbe építhető cochleáris implantátumhoz tervezett memrisztoralapú feldolgozóegység koncepcióját (Kövecz 2023), illetve egy hardverszintű, memrisztív elemek zajjelenségeit kihasználó sztochasztikus optimalizációs eljárás megvalósíthatóságát ismertetjük (Fehérvári et al. 2023).

OxRAM eszközök fejlesztése és alkalmazása

A fém-oxid-alapú, tetszőleges hozzáférést biztosító rezisztív kapcsolókból felépített mátrixmemóriákat gyakran nevezik OxRAM (Oxide Random Access Memory) eszközöknek. Ezek a memrisztorok az analóg programozhatóságon túl bináris memória kódolására is alkalmasak, a megbízható működést egy jól megválasztott alacsony és egy annál lényegesen nagyobb vezetőképességű állapot közötti, akár több nagyságrendbeli különbség biztosítja. Ilyen OFF/ON állapotok közötti stabil rezisztív kapcsolást mutatnak az *1.a-b ábrák*, saját fejlesztésű Pt/Nb₂O₅/Al és Pt/Ta₂O₅/Ta chipen kialakított (on-chip) eszközökben, amelyek szokásos vertikális kialakítását szemlélteti az *1.c ábra*. Általánosan a belső, nanoskálájú szigetelőréteg redox-reakciókkal kísért változása vezet a rezisztív kapcsolási jelenséghez, azaz az ellenállás megváltozásához. A legtöbb OxRAM eszközben az oxigénionok vagy pozitív töltésű betöltetlen kristályrács helyek (vakanciák) jelenlétéhez köthető a rezisztív kapcsolás (Yang–Strukov–Stewart 2013). Az oxigénhiányos régiók kialakulása a fémes kationok vegyértékállapot-változásához is vezethet, ami hozzájárulhat az ellenállás-változásához. Emiatt a mechanizmust *vegyértékállapot-változásnak* (VCM, valence change mechanism) is nevezik, mely egyaránt okozhat ún. határfelületi vagy filamentáris kapcsolást (Sawa 2008). Előbbi működése jellemzően az egyik elektróda és a dielektrikum közötti határterület teljes területén elszórva található lokalizált töltéscsopdák (vakanciákon) alapul. Az *1.c ábrán* illusztrált filamentáris kapcsolás esetén viszont egy vékony, oxigénhiányos fémes szál formálódik a szigetelőréteg belsejében – jellemzően a vakanciák mozgása által –, ami lehetővé teszi egészen parányi, nanométeres skálájú eszközök megva-



1. ábra

Saját készítésű OxRAM eszközök tipikus tulajdonságai. (a) Pt/Nb₂O₅/Al és (b) Pt-Ta₂O₅/Ta eszközök jellemző áram-feszültség karakterisztikái a kapcsolási irány feltüntetésével (piros/kék görbe: kikapcsolt/bekapcsolt állapot). (c) Vertikális eszközben kialakuló vezető filamentum. (d) Pt-Ta₂O₅/Ta eszköz pásztázó elektronmikroszkópos képe. (e) Zajos háttérben elrejtett neurális tüske detektálása egy OxRAM eszközzel. (Narancssárgával a meghajtott feszültség, piros/kék színekkel az eszköz ellenállása van ábrázolva. A lila szaggatott vonal egy olyan határellenállás-értéket jelöl, amely alatt egyértelmű a neurális tüske detektálási eseménye.)

Forrás: saját forrás

lósítását, akár atomi skálájú aktív tartománnyal (Török et al. 2020; Török et al. 2023).

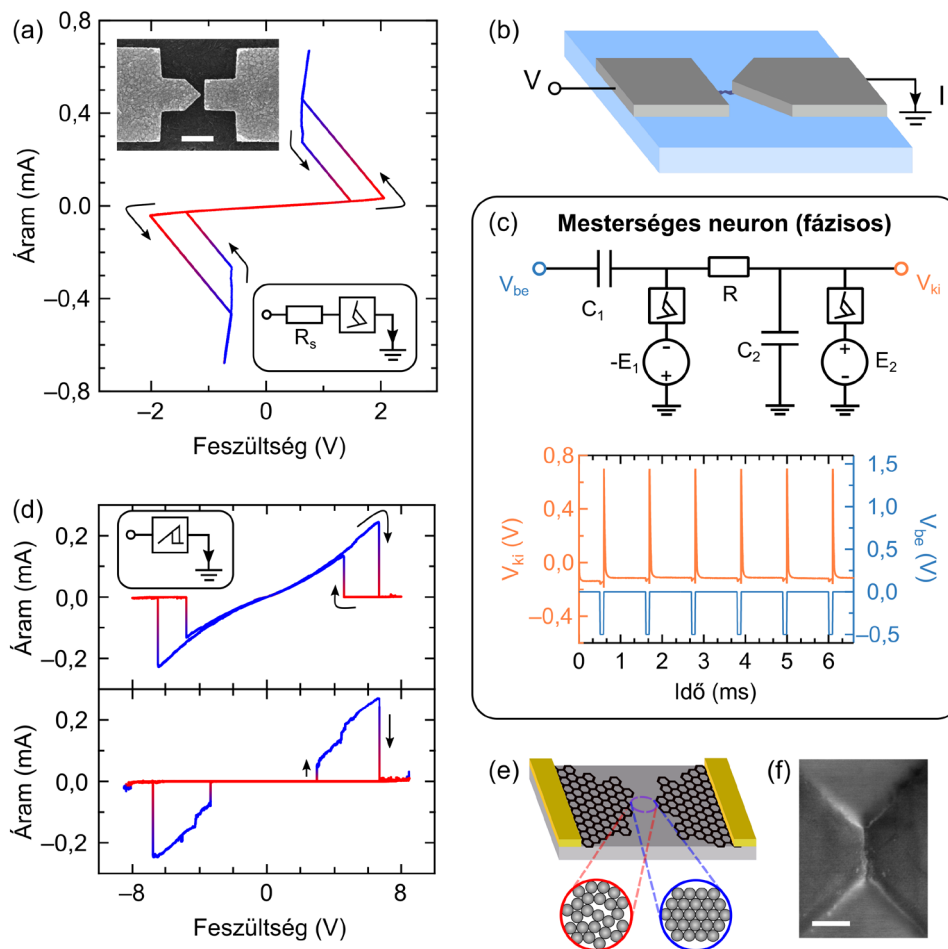
Az integrált memrisztív hálózatok létrehozásának alapkövetelményei az egyedi on-chip eszközök fejlesztése, gyártása és karakterizálása. Az 1.d ábrán egy saját fejlesztésű, keresztszálal on-chip memrisztor pásztázó elektronmikroszkópos képe látható. Az aktív tartomány az elektródák keresztezésénél található, ahol a két elektróda közrefogja a közbülső oxidréteget. A memrisztorok rezisztív kapcsoló tulajdonságai nagymértékben függenek az alkalmazott gyártási eljárásoktól, mivel az aktív réteg tulajdonságainak kicsiny eltérései nagyon eltérő karakterisztikákkal bíró eszközökhöz vezethetnek. Zajspektroszkópiás (Sánta et al. 2021) és egyéb elektromos karakterizációs mérések alapján alkalmunk nyílt kiválasztani a különböző összetételekkel készített memrisztív kapcsolók közül a legjobb eszközöket, így iteratív módon finomhangolva a gyártási paramétereket.

Az 1.e ábrán egy olyan mérés eredménye látható, ahol egyetlen Pt/Nb₂O₅/Al memrisztor belső dinamikai tulajdonságait hasznosítva (és azokat megfelelő módon hangolva) megvalósítható egy zajos háttérben érkező neurális tüske detektálása. A detektálás alapja, hogy míg a bemeneten érkező zaj nem okoz érdemi ellenállás-vál-

tozást, egy hosszabb impulzus valódi ellenállás-változást eredményez. Egy peremelektronikai eszközben ilyen ellenállás-változás nehezen detektálható, viszont egy hasonló jelet tovább vezetve egy illékony VO₂-memrisztor-alapú oszcillátor áramkör bemenetére, egy autonóm neurális tüskedetektor-egységet létesítettünk (Kövecses 2022; Molnár et al. 2023).

Fázisváltó memóriák fejlesztése és alkalmazása

A 2.a ábrán egy saját fejlesztésű VO₂-alapú fázisváltó memrisztor tipikus áramkarakterisztikája látható a rajta eső feszültség függvényében. Ez az eszköz alapvetően illékony memóriával bír, azaz zérus feszültség környékén az ellenállása mindig nagy értékű. Az eszközön eső feszültséget növelve, egy küszöbértéket elérve pillanatszerű ellenállás-csökkenés tapasztalható a lokális szigetelőfém átalakulásnak köszönhetően, majd a feszültség csökkentésekor az eszköz kikapcsol eredeti szigetelő állapotába. A kikapcsolás jellemzően kisebb feszültségen történik a bekapcsolási folyamatnál, hiszterézist okozva az eszköz áram-feszültség karakterisztikájában. A folyamat ellentétes előjelű feszültség hatására ugyanúgy vég-



2. ábra

Chipen kialakított fázisváltó memóriák tipikus tulajdonságai és a VO_2 -memrisztorok egy alkalmazási lehetősége. (a) VO_2 fázisváltó memória áram-feszültség karakterisztikája. (b) Planáris geometriájú VO_2 -alapú eszköz sematikus rajza. (c) VO_2 eszközökből építhető fázisos mesterséges neuron áramköri rajza és működésének szemléltetése a be- és kimeneti időfüggő feszültség-jelalakok ábrázolásával (kék, illetve narancssárga színekkel). (d) SiO_x -alapú fázisváltó memória különböző áram-feszültség karakterisztikái, eltérő periódusidejű és azonos nagyságú meghajtójelek hatására. (e) SiO_x -alapú eszköz sematikus rajza. (f) SiO_x -alapú eszköz pásztázó elektronmikroszkópos képe (skála: 200 nm)

Forrás: saját forrás; Török et al. 2022

bemegy. Ezeket az eszközöket VO_2 -hordozó réteg felületére leválasztott fém elektródapárral alakítottuk ki, planáris geometriában (2.a, illetve 2.b ábrák). Az ábrákon megfigyelhető planáris kialakítású nanorés elrendezéssel az eszköz aktív tartományának mérete egészen a ~ 10 nm-es tartományba csökkenthető (Pósa et al. 2023). Ezeknek a VO_2 -alapú fázisváltó memóriáknak a működését alapvetően az előállításuk során alkalmazott rétegleválasztási technikák, illetve az elektródafémek határozzák meg. Megfelelően kialakított, stabil kapcsolási karakterisztikákkal rendelkező eszközök felhasználásával olyan neuromorfikus áramkörök építhetők, amelyekkel reprodukálható sokfajta – az emberi idegrendszerben előforduló – elektromos jelalak és neurális működési mechanizmus (Yi et al. 2018). Egy ilyen neuromorfikus áramkör rajzát és működését mutatja a 2.c ábra. Az áramkör bemenetén érkező negatív előjelű feszültségimpulzusok (kék jelalak) felfutásakor az áramkör egy feszültségűtökét bocsát ki a kimeneten. Ez a működés az idegrendszerben előforduló fázisos neuronok működését idézi, amelyek akkor tüzelnek, amikor a beérkező sti-

mulus hirtelen változását érzélik. A VO_2 -memrisztorok ehhez hasonló neurális dinamikai tulajdonságait kiválóan lehet hasznosítani neuromorfikus számítási algoritmusok hardveres megvalósítására (Kumar et al. 2022).

A félvezetőipar egyik kiemelt jelentőségű alapanyaga, a szilícium-oxid is mutat rezisztív kapcsoló tulajdonságokat (ld. 2.d ábra). Kutatócsoportunkban olyan, ultra kis méretű memrisztív eszközöket fejlesztettünk ki (Pósa et al. 2017; Török et al. 2022), amelyeket SiO_2 hordozóréteg felületére leválasztott grafén nanoszalagokból lehet előállítani kontrollált elektromos formázási eljárással. Ilyen módon a standard litográfiás felbontásnál sokkal kisebb méretskálájú, pár nanométeres rést hozhatunk létre a grafén megszakításával, lekorlátozva a rezisztív kapcsolás aktív tartományát ebbe a piciny részbe (ld. 2.e-f ábra). Ezekben az eszközökben tapasztalható tipikus rezisztív kapcsoló karakterisztikákat mutat a 2.d ábra, szemléltetve az eszközök azon különleges tulajdonságát, hogy a meghajtó jelalak periódusidejének függvényében nulla feszültség környékén mind a bekapcsolt (ld. felső panel), mind a kikapcsolt (ld. alsó panel) állapot elérhe-

tó. A karakterisztikák ezen változatossága az eszköz működésére nagy hatással bír, kikapcsolást követő regenerálódási időnek, az ún. *holtidőnek* köszönhető (Pósa et al. 2017).

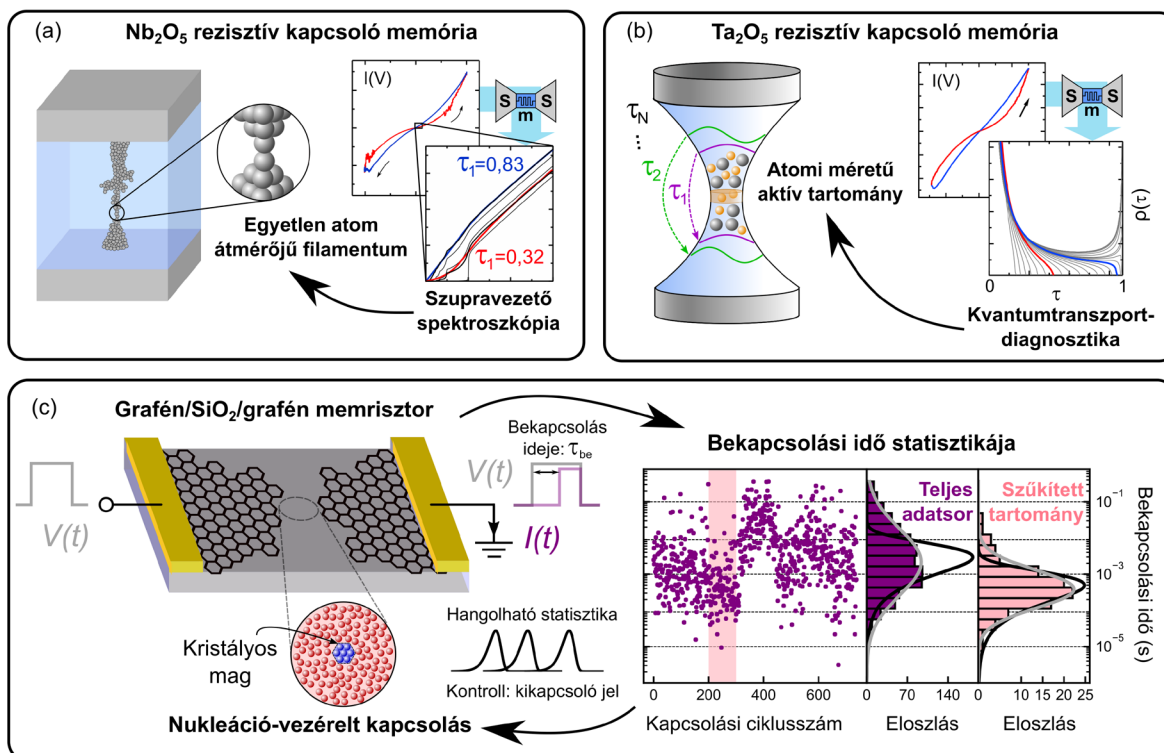
Memrisztív működés megértése

A rezisztív kapcsolás során kialakuló filamentumok fizikai természete, valamint a kapcsolási dinamikát okozó nanoskálájú, vagy akár atomi skálájú folyamatok tanulmányozása rendkívül fontos az újfajta eszközök fejlesztése szempontjából. A különböző anyagrendszerekben a memrisztív tulajdonságokat alakító fizikai mechanizmusok beható ismerete nélkül kifejezetten nehéz feladat lenne megbízható, a technológiai követelményeknek minden szempontból megfelelő eszközök fejlesztése.

Fém-oxid-alapú pontkontaktus eszközökön végzett szupravezető spektroszkópiás vizsgálataink roncsolásmentes diagnosztikai eszközt biztosítanak az eszközök aktív tartományában jelen lévő filamentumok in-situ, kísérleti vizsgálatához. A filamentum méretére vonatkozó, közvetlenül kinyerhető információn túl ezekkel a vizsgálati technikákkal lehetőség nyílik a filamentumok egyedi transzmissziós sajátértékeinek (Török et al. 2020) vagy a transzmissziós sűrűségfüggvényeinek meghatározására

(Török et al. 2023) a memrisztor bekapcsolt és kikapcsolt állapotaiban (ld. 3.a–b ábrák). A filamentum méretének pontos meghatározása nagy jelentőségű az eszköz skálázhatósága szempontjából, míg az utóbbi, elektrontranszportot jellemző fizikai mennyiségek a filamentumok atomi szintű szerkezetének finom részleteit tárják fel, lehetőséget biztosítva a későbbiekben akár atomi szintű fizikai memrisztormodellek (Ambrogio et al. 2017) kísérleti validálására.

A szilícium-oxid memrisztorok bekapcsolási folyamata eredendően sztochasztikus természetű. Az eszközök bekapcsolásiidő-statisztikájának vizsgálatával feltártuk, hogy a megfigyelt exponenciális bekapcsolásiidő-eloszlás közvetlen oka egy nukleációs folyamat (Febérvári 2020; Török et al. 2022). Ezen nukleációs folyamatból eredő bekapcsolásiidő-eloszlás hosszabb kapcsolási sorozatokban lassú változást mutathat, ám rövid ciklusszámú kapcsolási sorozatok esetén a statisztikát kontrollálni lehet az egyes bekapcsolási eseményeket megelőző kikapcsoló jel nagyságának megfelelő beállításával. A memrisztív rendszerek hangolható belső dinamikáját kihasználva neurális hálózatok aktivációs függvényei, sztochasztikusan tüzelő neuronok, illetve energiahatékony véletlenszám-generálás egyaránt megvalósíthatók (Sebastian et al. 2020).



3. ábra

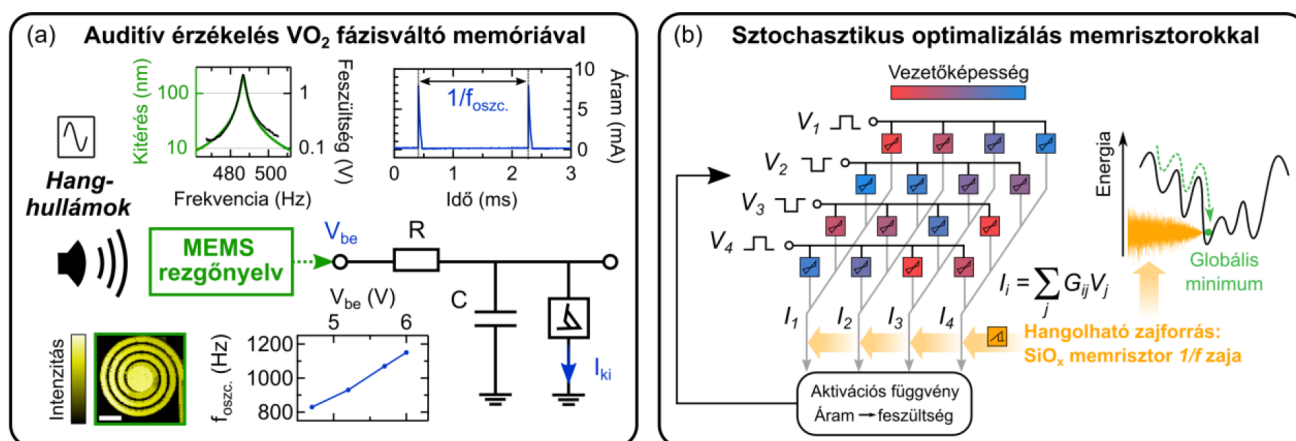
Atomi skálájú memrisztív működés megértése. (a) Szupravezető spektroszkópiás módszerrel feltárt egyetlen atom átmérőjű vezetési csatorna Nb_2O_5 -alapú eszközben. (b) Kvantumtranszport-diagnosztika a transzmisszió-eloszlások feltérképezésére; a Ta_2O_5 eszközök kikapcsolt állapotában egy rendkívül keskeny potenciálgát akadályozza az elektrontranszportot. (c) Grafén/szilícium-oxid/grafén nanorész-alapú fázisváltó memóriák bekapcsolásiidő-eloszlásának vizsgálata. A teljes adatsor (lila), illetve a szűkített tartomány (rózsaszín) statisztikai analízise alátámasztja, hogy az eszközben nukleáció-vezérelt kapcsolás zajlik, amely a kikapcsoló feszültségimpulzus nagyságának megfelelő beállításával kontrollálható.

Forrás: saját forrás; Török et al. 2020; Török et al. 2022; Török et al. 2023

Alkalmazások dinamikus memrisztor-áramkörökben

A továbbiakban két példával illusztráljuk a különféle memrisztív eszközök alkalmazhatóságát információfeldolgozási feladatokra. Az első koncepció egy olyan kis méretű, alacsony fogyasztású áramkör, amely a környezet mechanikai rezgései által keltett szenzorjeleket a hallóidegek számára befogadható formába kódolja (4.a ábra) (Kövecz 2023). Ennek első lépéseként közvetlenül a hanghullámokat vagy a középfülben elhelyezkedő hallócsontok rezgését egy spirál alakú *mikroelektromechanikai rendszerrel* (MEMS, micro-electromechanical system) alakítjuk át elektromos jelekké. A MEMS rezgőnyelv éles rezonanciával rendelkezik a spirál geometriai kialakításától függő frekvencián (Udvardi et al. 2017). Több, megfelelően hangolt rezgőnyelv alkalmazásával így frekvenciaszelektív érzékelést valósíthatunk meg. A rezgőnyelv által kiadott elektromos jel célzott feldolgozására kiválóan alkalmas egy memrisztoralapú relaxációs oszcillátor-áramkör, amely periodikus oszcillációba hozható a bemeneti feszültséggel arányos frekvencián. Ezáltal a beérkező hanghullám amplitúdóját a kimeneten megjelenő tüskés jelalak frekvenciájában kódolhatjuk. Az áramkör kis méretének és alacsony energiafogyasztásának köszönhetően a rendszer a jövőben súlyos halláskárosultak részére fejlesztett, teljesen beültethető cochleáris implantátumban (TICI: Totally Implantable Cochlear Implant) hasznosulhat.

A memrisztív eszközök egy másik alkalmazási lehetőségét mutatja a 4.b ábrán látható séma. Az ábrán látható keresztaszias memrisztor-architektúra kiválóan alkalmas nagy méretű mátrixok kódolására. A mátrixos összeköttetésben elhelyezett egyedi memrisztorok programozhatóak úgy, hogy vezetőképességükben egy-egy memóriacella adatát tárolják. A memrisztorok analóg programozási lehetőségének köszönhetően (Rao et al. 2023) a mátrixelemek megfelelően akár egy mesterséges neurális hálózat adott rétegében található analóg súlyoknak (Yang–Strukov–Stewart 2013), de akár bináris mátrixok kódolása is lehetséges olyan memrisztorokkal, amelyek vezetőképessége eléggé széles, több nagyságrendet átfogó tartományban változtatható. Ezzel a hálózattal egy vektor-mátrix szorzási művelet egyetlen lépésben, hardverszinten elvégezhető az Ohm-, illetve Kirchhoff-törvényeknek megfelelően. Míg a szorzandó (bemeneti) vektort a hálózat soraira adott feszültségek kódolják, az eredmény (kimeneti) vektort pontosan az oszlopok végén mérhető áramértékek adják. Ha egy ilyen memrisztorhálózattal szeretnénk például egy Hopfield neurális hálózatot optimalizációs feladatra használni (Cai et al. 2020), a megoldandó problémát kódolhatjuk a memrisztorok vezetőképességében, és egy iteráció egyetlen lépésben elvégezhető. Ehhez mindössze a kimeneti vektorra alkalmazott aktivációs függvényt kell megvalósítani, illetve az áramértékek feszültséggé alakítását kell biztosítani a rekurrens működéshez. A memrisztív hálózat a nagy méretű szorzási feladatot hardvergyorsítóként egyetlen lépésben elvégzi. A Hopfield neurális hálózat a kódolt súlyokon keresztül egy energiafüggvényt rendel megoldandó problémához úgy, hogy az energiafüggvény minimuma jelenti a probléma megoldását. Megmutatható, hogy minden egyes iteráció során úgy változik a neuronok állapota, hogy az energiafüggvény csökkenjen. A hálózat azonban a működés során beragadhat lokális minimumokba, amit a memrisztoresységek megfelelően testreszabott zajával (Sánta et al. 2021; Fehérvári 2021; Fehérvári et al. 2023) vagy külső zajinjekció segítségével kerülhetünk el. Azaz, a memrisztoresységek zajhangolásával elérhetjük a memrisztív Hopfield-hálózat mint



4. ábra

Memrisztorok belső működésének hasznosítása hardverszintű információfeldolgozási feladatokra peremelektronikai rendszerekben. (a) Mesterséges auditív érzékelés koncepciója neurodinamikus VO_2 -memrisztorral. A rezgőnyelv elektromos jelét megfelelő kondicionálás után a memrisztoralapú oszcillátor-áramkörbe vezetve, a kimeneti áram tüskés jelalakot mutat. A beérkező stimulus nagyságát a kimeneti frekvenciában kódolhatjuk, hasonlóan a hallóidegek működéséhez. (b) Sztochasztikus optimalizációs eljárás koncepciója egy keresztaszias memrisztor-architektúrán kódolt Hopfield-hálózattal. Az optimumkeresési eljárás hatékonyságát a memrisztoresységek zajának testreszabásával vagy külső zajinjekcióval tudjuk tökéletesíteni

Forrás: saját forrás; Fehérvári et al. 2023

sztochasztikus optimalizálásra alkalmas hardver optimalis működését (Fehérvári 2022; Fehérvári et al. 2023). Ezek a sztochasztikus Hopfield-hálózatok több olyan gyakorlati probléma megoldására alkalmazhatók, mint például a forgalomirányításban a légitársaságok menetrendjének kialakítása, vagy a félvezetőiparban a chipek vezetékének optimalizálása (Cai et al. 2020).

Összegzés

Jelen munkával a saját gyártású nanoskálájú memrisztív eszközök kísérleti vizsgálatán túl az eszközök információfeldolgozási eljárásokban történő alkalmazhatóságára mutattunk példákat peremelektronikai rendszerekben. Előbbi célra szupravezető spektroszkópiás mérési módszerrel fejlesztettünk ki a memrisztorokban található atomi skálájú filamentumok roncsolásmentes detektálására. Emellett szilícium-oxid memrisztorok nukleációs folyamatának hangolható sztochasztikus jellegét is feltártuk. Végül az általunk fejlesztett és vizsgált nanoméretű memrisztív eszközök alkalmazhatóságát két példán keresztül szemléltettük. Egyfelől bemutattuk egy neuro-morfikus, memrisztoralapú érzékelőegység koncepcióját, amely egy teljesen beültethető cochleáris orvosi implantátumként hasznosulhat a jövőben. Másfelől pedig egy sztochasztikus optimalizálási eljárás hardverszintű, teljes egészében memrisztorokból álló architektúráján történő megvalósíthatóságára mutattunk példát, ami a memrisztorok hangolható zajkarakterisztikáját használja.

Köszönetnyilvánítás

A 963575 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2020 pályázati program finanszírozásában valósult meg. Szintén a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával valósult meg a TKP2021-NVA-03 projekt.



Irodalomjegyzék

- Ambrogio, S., Magyari-Köpe, B., Onofrio, N., Mahbulul Islam, M., Duncan, D., Nishi, Y., & Strachan, A. (2017) Modeling resistive switching materials and devices across scales. *Journal of Electroceramics*, Vol. 39. pp. 39–60. <https://doi.org/10.1007/s10832-017-0093-y>
- Ambrogio, S., Narayanan, P., Tsai, H., Shelby, R. M., Boybat, I., Di Nolfó, C., ... & Burr, G. W. (2018) Equivalent-accuracy accelerated neural-network training using analogue memory. *Nature*, Vol. 558. No. 7708. pp. 60–67. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0180-5>
- Cai, F., Kumar, S., Van Vaerenbergh, T., Sheng, X., Liu, R., Li, C., ... & Strachan, J. P. (2020). Power-efficient combinatorial optimization using intrinsic noise in memristor Hopfield neural networks. *Nature Electronics*, Vol. 3 No. 7. pp. 409–418. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0436-6>
- Fehérvári J. G. (2020) Nanoméretű fázisváltó memóriák időskáláinak kísérleti vizsgálata. BME, TTK kari TDK dolgozat.
- Fehérvári J. G. (2021) Sztochasztikus jelenségek rezisztív kapcsoló memóriákban. BME, TTK kari szakdolgozat.
- Fehérvári J. G. (2022) Sztochasztikus optimalizáció hangolható zajforrásként működő memrisztorok segítségével. BME, TTK kari TDK dolgozat.
- Fehérvári, J. G., Balogh, Z., Török, T. N., & Halbritter, A. (2023) Noise tailoring, noise annealing and external noise injection strategies in memristive Hopfield neural networks. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2307.12111>
- Kövecs A. R. (2022) Neurális dinamikával rendelkező memrisztor alapú detektoráramkör megvalósítása. BME, TTK kari TDK dolgozat.
- Kövecs A. R. (2023) Memrisztor-alapú jelfeldolgozó egység tervezése cochleáris implantátumokhoz. BME, TTK kari szakdolgozat.
- Kumar, S., Wang, X., Strachan, J. P., Yang, Y., & Lu, W. D. (2022) Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing. *Nature Reviews Materials*, Vol. 7. No. 7. pp. 575–591. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00434-z>
- Molnár, D., Török, T. N., Kövecs, R., Pósa, L., Balázs, P., Molnár, G., ... & Halbritter, A. (2023) Autonomous neural information processing by a dynamical memristor circuit. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2307.13320>
- Moon, J., Ma, W., Shin, J. H., Cai, F., Du, C., Lee, S. H., & Lu, W. D. (2019) Temporal data classification and forecasting using a memristor-based reservoir computing system. *Nature Electronics*, Vol. 2. No. 10. pp. 480–487. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0313-3>
- Pósa, L., El Abbassi, M., Makk, P., Sánta, B., Nef, C., Csontos, M., ... & Halbritter, A. (2017) Multiple physical time scales and dead time rule in few-nanometers sized graphene–SiO_x–graphene memristors. *Nano Letters*, Vol. 17. No. 11. pp. 6783–6789. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b03000>
- Pósa, L., Hornung, P., Török, T. N., Schmid, S. W., Arjmandabasi, S., Molnár, G., ... & Volk, J. (2023) Interplay of Thermal and Electronic Effects in the Mott Transition of Nanosized VO₂ Phase Change Memory Devices. *ACS Applied Nano Materials*, Vol. 6. No. 11. pp. 9137–9147. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c00150>
- Rao, M., Tang, H., Wu, J., Song, W., Zhang, M., Yin, W., ... & Yang, J. J. (2023) Thousands of conductance levels in memristors integrated on CMOS. *Nature*, Vol. 615. No. 7954. pp. 823–829. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05759-5>
- Sánta, B., Balogh, Z., Pósa, L., Krisztián, D., Török, T. N., Molnár, D., ... & Halbritter, A. (2021) Noise tailoring in memristive filaments. *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 13. No. 6. pp. 7453–7460. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c21156>

- Sawa, A. (2008) Resistive switching in transition metal oxides. *Materials Today*, Vol. 11. No. 6. pp. 28–36. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(08\)70119-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70119-6)
- Sebastian, A., Le Gallo, M., Khaddam-Aljameh, R., & Eleftheriou, E. (2020) Memory devices and applications for in-memory computing. *Nature Nanotechnology*, Vol. 15. No. 7. pp. 529–544. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0655-z>
- Török, T. N., Csontos, M., Makk, P., & Halbritter, A. (2020) Breaking the quantum PIN code of atomic synapses. *Nano Letters*, Vol. 20. No. 2. pp. 1192–1200. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b04617>
- Török, T. N., Fehérvári, J. G., Mészáros, G., Pósa, L., & Halbritter, A. (2022) Tunable, Nucleation-Driven Stochasticity in Nanoscale Silicon Oxide Resistive Switching Memory Devices. *ACS Applied Nano Materials*, Vol. 5. No. 5. pp. 6691–6698. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00722>
- Török, T. N., Makk, P., Balogh, Z., Csontos, M., & Halbritter, A. (2023) Quantum Transport Properties of Nanosized Ta₂O₅ Resistive Switches: Variable Transmission Atomic Synapses for Neuromorphic Electronics. *ACS Applied Nano Materials*. Vol. 6. No. 22. pp. 21340–21349. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c04769>
- Udvardi, P., Radó, J., Straszner, A., Ferencz, J., Hajnal, Z., Soleimani, S., ... & Volk, J. (2017). Spiral-shaped piezoelectric MEMS cantilever array for fully implantable hearing systems. *Micromachines*, Vol. 8. No. 10. pp. 311. <https://doi.org/10.3390/mi8100311>
- Wang, Z., Wu, H., Burr, G. W., Hwang, C. S., Wang, K. L., Xia, Q., & Yang, J. J. (2020) Resistive switching materials for information processing. *Nature Reviews Materials*, Vol. 5. No. 3. pp. 173–195. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0159-3>
- Yang, J. J., Strukov, D. B., & Stewart, D. R. (2013) Memristive devices for computing. *Nature Nanotechnology*, Vol. 8. No. 1. pp. 13–24. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.240>
- Yi, W., Tsang, K. K., Lam, S. K., Bai, X., Crowell, J. A., & Flores, E. A. (2018) Biological plausibility and stochasticity in scalable VO₂ active memristor neurons. *Nature Communications*, Vol. 9. No. 1. Article No. 4661. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07052-w>
- Yuan, R., Duan, Q., Tiw, P. J., Li, G., Xiao, Z., Jing, Z., ... & Yang, Y. (2022) A calibratable sensory neuron based on epitaxial VO₂ for spike-based neuromorphic multisensory system. *Nature Communications*, Vol. 13. No. 1. Article No. 3973. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31747-w>
- Zidan, M. A., Strachan, J. P., & Lu, W. D. (2018) The future of electronics based on memristive systems. *Nature Electronics*, Vol. 1. No. 1. pp. 22–29. <https://doi.org/10.1038/s41928-017-0006-8>

A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID_1)