

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ÉPÍTŐELEME – AZ Ag_2S MEMRISZTOR

Gubicza Ágnes, Geresdi Attila, Csontos Miklós, Halbritter András, Mihály György
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, TTK Fizika Tanszék
és MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport

Emlékező ellenállás

Az angol „memory” és „resistor” szavak összetételéből képzett *memrisztor* egy olyan passzív áramkört elem, amelynek ellenállása függ a rajta korábban átfolyó áramtól. Pillanatnyi értékét az határozza meg, hogy előzőleg milyen irányban és mennyi töltés haladt rajta keresztül. A legegyszerűbb memrisztor egy elektrokémia cella, aminek ellenállása megnő, ha az áramot szállító ionok kiválnak az elektródán, és lecsökken, ha ellenértés polaritás alkalmazásával visszaoldódnak. Az elektrokémiai cella kis feszültségen mért ellenállása olyan memória, amelynek értéke nem digitálisan változik, hanem folytonosan, és ezen *analóg memória* tartalma attól függ, hogy a korábbi folyamatok után éppen mekkora a rendelkezésre álló ionok koncentrációja.

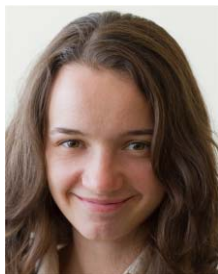
A területen folyó kutatások az elmúlt 10 évben – amikor világhosszú vált, hogy a korszerű nanotechnológiai eljárásokkal létrehozott memrisztorok forradal-

masíthatják a számítástechnikát – gyorsultak fel. Fém- és félvezető-komponensekből sokféle felépítésű és különböző elvek alapján működő memrisztorokat hoztak létre (a példaként felhozott elektrokémiai cellától eltérően, ezekben az elektronok vezetik az áramot). A nanoméretű memrisztorokból épített hálózatokkal ambiciózus célok elérését tűzték ki célul. Az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma kutatócsoportjának felelős részlege a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 2008-ban indított *Synapse* (Systems of Neuromorphic Adaptive Scalable Electronics) projektje ezidáig például több mint 100 millió USA dollárral támogatta egy olyan mesterséges intelligencia megvalósítását, amelynek építőelemei az emberi idegsejteket összekötő szinapszisokhoz hasonlóan működő memrisztorok. A szinapszisok folytonosan változó erősségéhez hasonlóan a memrisztor vezetőképessége is analóg módon hangolható, ráadásul az információ beírása ugyanazokon a kapcsolatokon keresztül történik, mint a kiolvasása (szemben például a tranzisztorokkal, ahol ehhez egy harmadik terminál is szükséges). Egy ilyen mesterséges *neuromorf architektúrát* ismertet a *Nature* 2015. májusi száma.

Ebben a cikkben a BME Fizikai Intézetében folyó memrisztor-kutatások legújabb eredményeit foglaljuk össze az ezüst-szulfid rétegben kialakított, vékony vezető szálakon végzett kísérletek bemutatásával. Az ezüst-szulfid réteg tipikus vastagsága ~20 nm, a ben-



Mihály György egyetemi tanár, az MTA rendes tagja, az MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport vezetője a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe kísérleti szilárdtestfizika, ezen belül különleges elektromos és mágneses tulajdonságú anyagokban megfigyelhető jelenségek vizsgálata. A cikk társszerzői témavezetésével készítettek diploma és doktori disszertációjukat.



Gubicza Ágnes az MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport tudományos munkatársa. Fizikus diplomáját és PhD fokozatát 2013-ban és 2017-ben szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe memrisztorok előállítása nanotechnológiai eljárásokkal és kapcsolási dinamikájuk kísérleti vizsgálata.



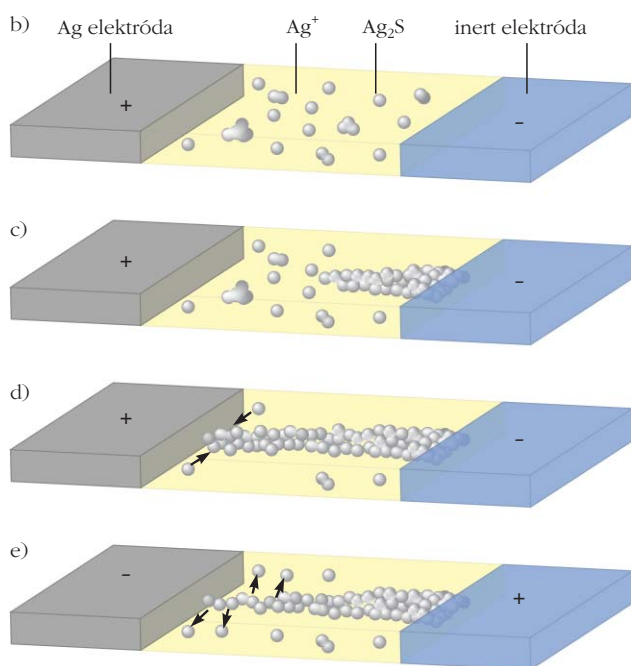
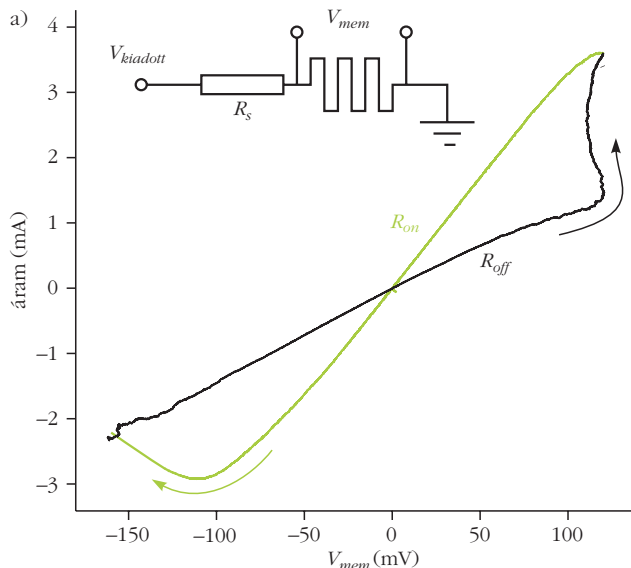
Csontos Miklós az MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport tudományos főmunkatársa. Mérnök-fizikus diplomáját és PhD fokozatát 2002-ben és 2007-ban szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe az atomi méretskálájú memóriaszervezők tervezése, gyártása és kísérleti vizsgálata.



Geresdi Attila kutató a Delfti Műszaki Egyetem (Hollandia) QuTech intézetében. Mérnök-fizikusként végzett a BME Fizika Tanszéken 2007-ben és ugyanitt doktorált 2011-ben. Fő kutatási területe a szupravezetés kísérleti vizsgálata nanométer méretskálán.



Halbritter András egyetemi tanár, az MTA doktora, a BME Fizika Tanszék tanszékvezetője. Mérnök-fizikus diplomáját és PhD fokozatát 1999-ben és 2003-ban szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe az atomi és molekuláris nanovezetékek, valamint atomi méretű memóriák kísérleti vizsgálata.



1. ábra. a) Feszültség-áram karakterisztika háromszög meghajtás esetén. Fent: memrisztor és soros ellenállás kapcsolása. b)–e) vezetőlánc kialakulása a szigetelőben.

ne kialakuló, fémesen vezető ezüst nanovezeték keresztmetszete 3-10 nm. Ez a konstrukció egy olyan memrisztor, amelynek ellenállása az ezüst nanovezeték vastagságától függ. A nanovezeték kialakulását és ellenállásának aktuális értékét a korábban lejátszódott elektromos folyamatok – mint ahogy az alábbiakban részletesebben is ismertetjük – határozzák meg.

Az Ag_2S memrisztor feszültség-áram karakterisztikáját az 1.a ábra mutatja, működési elvét az 1.b–e ábrák szemléltetik. Az ezüst-szulfid vékonyréteget egy planáris ezüstelektroda felületén hozzuk létre, amihez egy hegyes tűt érintünk. Így jön létre az 1.b–e ábrákon látható rétegszerkezet, amelyben az inert elektróda az elektrokémiailag semleges tű hegye. Az ezüstelektroda és a tű hegye közti ezüst-szulfid réteg-

ben az ezüstionok könnyen diffundálnak. A tű hozzáérintése utáni kiindulási állapotban a memrisztor nagy ellenállású, hiszen a két oldalt csak az elektromosan rosszul vezető Ag_2S réteg köti össze. Ha az inert elektródára az ezüstelektrodához képest megfelelően nagy negatív feszültséget kapcsolunk, akkor az ezüstelektrodából Ag^{2+} ionok lépnek ki az ezüst-szulfid rétegbe, ott az elektromos tér hatására a másik elektróda felé mozognak, majd fémes ezüstként kiválnak. Mivel az elektromos erővonalak mindig a kivált Ag-réteg csúcsa felé mutatnak, önszerveződő módon egy keskeny Ag-nanovezeték kezd el nőni a két elektróda között. Ez egy idő után rövidre zárja a két elektródát, majd a két kontaktus között kialakult nanovezeték fokozatosan vastagodik és az elektródák között mérhető ellenállás lecsökken. Ellentétes feszültséget alkalmazva fordított folyamat játszódik le, azaz a nanovezeték vékonyodik, az ellenállás nő. Az alkalmazások szempontjából kedvező paraméterekkel rendelkező memrisztor esetében a két elektródát mindig összeköti az elektromosan jól vezető ezüst-nanovezeték, és a megfelelő feszültségekkel történő vezérlés során ennek keresztmetszete változik.

A memrisztor vezérlése az 1.a ábrán mutatott egyszerű kapcsolási rajz szerint történik (a meanderszimbólum a memrisztor nemzetközi jelölése). Az áramkörben fontos szerepet tölt be az R_s soros ellenállás, ami korlátozza a memrisztoron átfolyó áramot, ha annak ellenállása lecsökken. Kiindulási állapotban a memrisztor ellenállása a nagyobb R_{OFF} értéket veszi fel. Az ezüstelektrodára adott feszültséget növelve a két elektródát összekötő ezüst-nanovezeték egy küszöbfeszültségnél vastagodni kezd, az áram megnő, és a memrisztor az ON bekapcsolt állapotba kerül. A kisebb ellenállású R_{ON} értéke folyamatosan hangolható: minél nagyobb a kiadott feszültség (illetve a soros ellenállás által limitált áram), annál kisebb ellenállás érhető el. A feszültséget visszacsökkentve ismét egy közel lineáris feszültség-áram karakterisztika figyelhető meg. Megfelelően nagy negatív feszültségnél a nanovezeték elvékonyodik, és a memrisztor visszaállítható az eredeti OFF állapotba. Az ábrán jól látszik, hogy a memrisztor memóriaként működik: nagy pozitív vagy nagy negatív feszültséggel kapcsolhatunk az OFF és ON állapotok között, míg kis feszültségnél mindkét állapotban passzív ellenállásként viselkedik, azaz az állapot megváltoztatása nélkül kiolvashatjuk, hogy melyik memóriállapotban van.

Mezozkopikus vezetés¹

Az 1. ábra egy olyan memrisztor működését mutatja, amelynek alacsony feszültségen mért ON és OFF ellenállásai a néhány száz ohmos tartományba esnek, és ezen ellenállásokat tizedvolttos feszültségekkel lehet kapcsolni, miközben az eszközön milliampere áram folyik. Ezen értékek mindennek előtt azt jelzik,

¹ Ez egy nehezebb, átugorható fejezet.

hogy az Ag₂S memriszor a gyakorlati alkalmazás szempontjából ideális paraméterekkel rendelkezik. A számszerű értékek ugyanakkor egy súlyos kérdést is felvetnek: hogyan folyhat egy néhány nanométer átmérőjű vezetéken milliamperes áram? Az ehhez tartozó 10⁹-10¹⁰ A/cm²-es, hihetetlenül nagy áramsűrűséget egy szokásos (makroszkopikus) vezeték nem tudja szállítani, hiszen ~10⁴-10⁵ A/cm²-es értéknél a legjobban vezető fémről készült vezeték is megolvad az áram által keltett Joule-hőtől. És egyáltalán, honnan lehet tudni, milyen átmérőjű a nanovezeték?

Mindkét kérdésre választ ad a mezoszkopikus vezetési tulajdonságok Landauer-elmélet keretében történő értelmezése. Az elmélet az elektronok terjedését abban a mérettartományban vizsgálja, amely rövidebb az energiacserevel járó rugalmatlan ütközések távolságánál. Ilyen kis méreteknél nem alakul ki termikus egyensúly az elektronok és a nanovezeték atomjai között. Az elektronok terjedését ebben a nemegyensúlyi folyamatban – a szokásos fajlagos ellenállás helyett – a vezetéken való átjutás, azaz a T transzmissziós valószínűséggel lehet leírni. Azt, hogy hány különböző elektron haladhat át egyszerre a vezetéken, a nyitott csatornák M száma határozza meg. A vezetési csatornák száma az A keresztmetszettel arányos geometriai paraméter, és a fémbe terjedő elektronok λ hullámhosszából közvetlenül számolható, $M \sim A/\lambda^2$. A fenti elmélet keretében egy nanovezeték G vezetőképessége a több vezetési csatornára átlagolt transzmissziós valószínűség és a vezetési csatornák számának szorzatával arányos:

$$G = \frac{1}{R} = G_0 M T, \quad (1)$$

ahol

$$G_0 = \frac{2e^2}{h}$$

az úgynevezett vezetőképesség-kvantum, értékét az elektron e töltése és a h Planck-állandó határozza meg:

$$G_0 = \frac{1}{12,9 \text{ k}\Omega}.$$

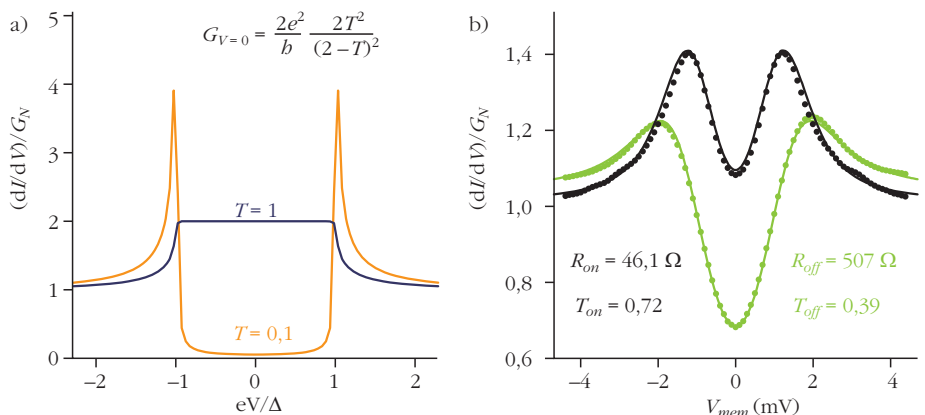
A nanovezeték M és T paramétereit egy szupravezető elektróda alkalmazásával egymástól függetlenül is meg lehet határozni. A szupravezető anyagokban a zérus ellenállású szuperáramot elektronpárok, az úgynevezett Cooper-párok viszik, minden párt két, egymáshoz képest ellentétes spinű elektron alkot. Egyedülálló elektronok csak egy bizonyos feszültség szint fölött, a Δ tiltott sáv energiájánál nagyobb energiával tudnak be-

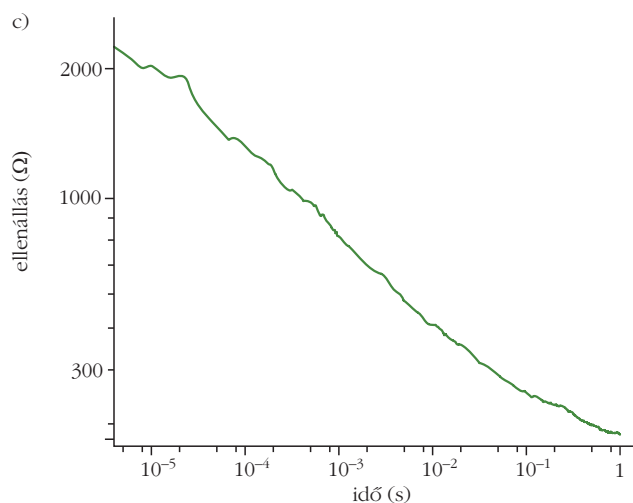
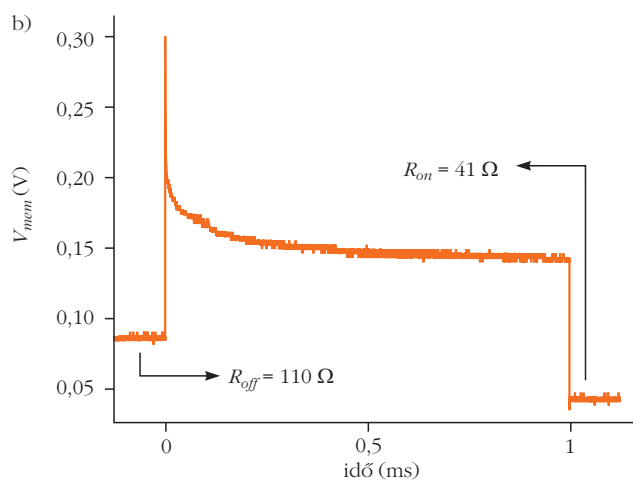
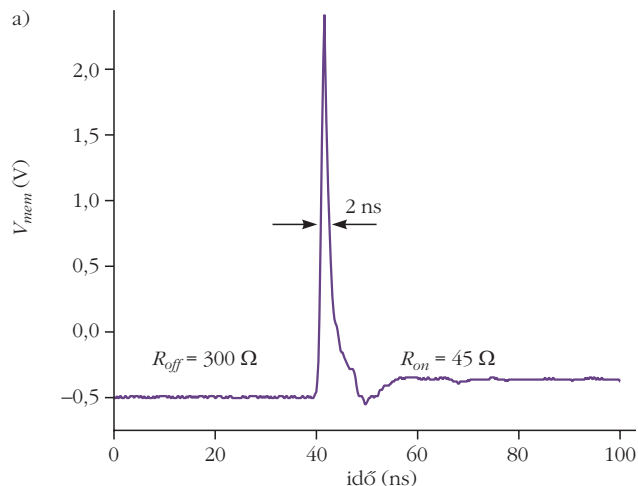
lépni a szupravezetőbe. Ha az inert elektródát szupravezető anyagból készítjük, akkor a vezetőképességet (és a differenciális vezetőképességet) nagy feszültségeknél továbbra is az (1) összefüggés írja le, ami egy egyszerű fémből készült tűre vonatkozott, azaz $G = G_N$ (az N index a „normál”, tehát nem szupravezető fémből készült tű alkalmazására utal). Szupravezető tű esetén azonban a néhány mV alatti feszültségeknél – amikor is az elektronok eV energiája kisebb, mint a szupravezetőre jellemző tiltott sáv – az elektronok csak az úgynevezett Andrejev-reflexió során keresztül juthatnak be a kontaktusba. Ez a folyamat formálisan annak felel meg, hogy beérkezik egy elektron a szupravezető határfelületére, belép egy Cooper-pár és egy, a bejövő elektronhoz képest ellentétes spinű „lyuk” visszaverődik. (Megjegyzés: ha egy szilárd testben elektronok haladnak negatív tömeggel valamilyen irányba, arra úgy is tekinthetünk, mintha pozitív töltésű „lyukak”, azaz elektronhiányok haladnának ellentétes irányba.) A differenciális vezetőképesség ekkor az úgynevezett Blonder–Tinkham–Klapwijk-elmélet segítségével írható le, ami egy vezetési csatornára nulla hőmérsékleten és zérus feszültség esetén az alábbi egyszerű összefüggést adja:

$$G = G_0 \frac{2T^2}{(2-T)^2}. \quad (2)$$

Ha a vezetési csatorna 100%-osan transzparens ($T=1$), akkor a zérus feszültségnél vett vezetőképessége kétszerese a nagy feszültségen mért értéknek, ami annak felel meg, hogy valamennyi, határfelületre érkező elektron Andrejev-reflektálódik, azaz egy elektron beérkezése esetén két elektrontöltés halad át a határfelületen (egy elektron és egy „lyuk”). Egy $T \ll 1$ transzmissziójú alagútátmenet esetén viszont a kisfeszültségű vezetőképesség lényegesen lecsökken a nagy feszültségen várhatóhoz képest, hiszen az előbbi a két áthaladó töltés miatt az átmeneti valószínűség négyzetével, míg az utóbbi az átmeneti valószínűség skálázódik.

2. ábra. a) Szupravezető-normál kontaktus differenciális vezetőképessége a feszültség függvényében, nulla hőmérsékleten (elméleti számolás). b) Differenciális vezetőképesség egy memrisztor-szupravezető határfelületen a kapcsolás előtti és utáni állapotban (kísérleti eredmény). Az ON \rightarrow OFF kapcsolásakor a vezetőképesség több mint egy nagyságrendet csökken (az $R = 1/G_N$ ellenállás több mint egy nagyságrendet nő).





3. ábra. a) 500 ps pulzus hatására bekövetkező ellenállás-változás. b) 1 ms pulzus alatti feszültségesés. c) A memrisztor ellenállásának időfüggése, ha a memrisztorra és a soros ellenállásra konstans feszültséget kapcsolunk.

Egy széles feszültségtartományra a 2.a ábra mutatja a nulla hőmérsékletű határesetre végzett elméleti számolás eredményét. Véges hőmérsékleten az éles csúcsok kiszélesednek, és a BTK-formulának megfelelő függvény lekerekedik. A 2.b ábrán a teli karikák a nióbiumtűvel készített Ag₂S memrisztor kísérleti

pontjait jelzik, míg a folytonos görbék a BTK-formula illesztései. A Nb szupravezető tiltott sáv értéke (1,55 meV) és mérés hőmérséklete (4,2 K) ismert, az illesztési paraméter egyedül az átlagos transzmisszió nagysága. Az illesztésből meghatározott átlagos transzmissziók ismeretében az 1. egyenlet alapján kiszámolható a nyitott csatornák száma is. Ebből látszik, hogy az ON → OFF kapcsolásakor az átlagos transzmisszió lecsökken ugyan, de az ellenállás változását döntően a nyitott csatornák számának változása határozza meg. Ebben a kísérletben a nyitott csatornák száma 400-ról 60-ra csökken, ami a nanovezeték átmérőjének 10 nm-ről 3 nm-re csökkenését jelenti.

A szupravezető tűvel végzett kísérlet tehát igazolja, hogy az ezüst-szulfid memrisztorban kialakított ezüstvezeték néhány nanométer átmérőjű. Legalább ennyire fontos, hogy egyúttal alátámasztja a mezoszkopikus elmélet alkalmazásának szükségességét is, aminek alapvetése, hogy ilyen kis méreteknél nem alakul ki termikus egyensúly a vezetékben belül. Az elektronok csak a nanovezetéken történt áthaladás után, a sokkal nagyobb méretű kontaktusok tartományában kerülnek termikus egyensúlyba, emiatt a Joule-hő ott oszlik el. A folyamat teljesen más, mint amit makroszkopikus méreteknél megszoktunk: miközben a nanovezeték tulajdonságai határozzák meg az R ellenállás értékét, az ellenálláshoz tartozó $I^2 R$ Joule-hő nem a nanovezetékben keletkezik. A memrisztoron keresztül folyó áramsűrűség valóban hatalmas, 10^9 - 10^{10} A/cm², mégsem teszi tönkre az eszközt.

A kapcsolás dinamikája

Ahhoz, hogy a memrisztorok jól alkalmazhatók legyenek integrált memóriaelemként, a kis méret mellett fontos követelmény, hogy a kapcsolási folyamat megfelelően gyors legyen. Mivel a kapcsolás során a nanovezeték átmérője csupán néhány atomi réteggel változik és az elektromos tér által hajtott elmozdulások is atomi léptékűek, a kapcsolás diffúziós mechanizmusa kellően gyors lehet. Ugyanilyen fontos azonban, hogy az ON és OFF állapotokhoz tartozó ellenállások értékei alacsonyak legyenek, hiszen az elkerülhetetlen szórt kapacitások miatt egy nagy ellenállás nagy időállandójú RC-kört alkotna, ami egyfajta aluláteresztő szűrőként hatva megakadályozná a gyors működést. A fémesen vezető ezüst-szulfid memrisztorok e feltételnek is eleget tesznek: a 100 ohm körüli ellenállásértékek a tipikusan néhány pF-os áramköri szórt kapacitás mellett akár GHz feletti működést is megengednek. A 3.a ábra egy nagy amplitúdójú, 500 ps-os impulzussal kiváltott OFF → ON kapcsolást mutat. Az ábrán jelölt 2 ns-os szélesség a kísérletben alkalmazott oszcilloszkóp időbeli felbontását jelzi, ez egy felső határ a kapcsolási időre. A memrisztor kétértelműen alkalmas nagy sebességű működésre.

Az Ag₂S memrisztor dinamikai tulajdonságai azonban ezen túlmutatóan is rendkívül érdekesek: a folyamatot nem egyetlen időállandó írja le, mint például

egy kondenzátor kisülését, ráadásul a kapcsolás sebessége szabályozható az alkalmazott feszültség nagyságával. Az alacsonyabb feszültségszinten végzett kísérletek rámutatnak egy sajátos visszacsatolási mechanizmusra: ahogy a kapcsoláskor csökken az ellenállás, a feszültség egyre nagyobb része a soros ellenálláson esik, így a memrisztoron eső feszültség is lecsökken, ami miatt fokozatosan lassul az elektromos tér által indukált diffúziós folyamat, lassul a vezető szál vastagodása. Ez az oka annak, hogy a folyamat nem egy szokásos exponenciális lecsengéssel zajlik, amit egyetlen időállandó jellemezne. Ugyanaz a memrisztor, ami a néhány voltos feszültségszinten akár 10^{-9} másodperc alatt is képes átkapcsolni (3.a ábra), néhány tizedvoltnál a milliszekundumos időskálán változik (3.b ábra), illetve a kapcsolási folyamat akár időben 5 nagyságrenden keresztül zajlik (3.c ábra).

Ezt a jelenséget egy másik módszerrel is vizsgálhatjuk, ha a feszültség-áram karakterisztikák mérésénél változtatjuk a meghajtó háromszögjel amplitúdóját és frekvenciáját. Kis amplitúdójú meghajtásnál a memrisztor adott állapotára jellemző egyetlen ellenállásértéket lehet mérni, nem látszik a kapcsolás, ahogy a 4.a ábra mutatja. Nagyobb feszültségeken végzett ciklusoknál lezajlik a kapcsolás, és 1-nél nagyobb R_{OFF}/R_{ON} arány mérhető. Ez az arány fokozatosan nő, ahogy a meghajtó háromszögjel amplitúdója növekszik. A kísérlet eredménye függ a háromszögjel frekvenciájától is: magas frekvenciákon nagyobb feszültség szükséges a kapcsoláshoz. A 4.b ábra az egyazon memrisztoron végzett tízezer mérés eredményét összefoglaló feszültség-frekvencia diagram. Az egyenletes szürke tartományban $R_{OFF}/R_{ON} = 1$, azaz a memrisztor nem kapcsol, míg a szaggatott vonal feletti részben a szürke árnyalat tónusa jelzi a kapcsolás nagyságát. Egy adott kapcsolási szintet jellemző tónus jó közelítéssel a

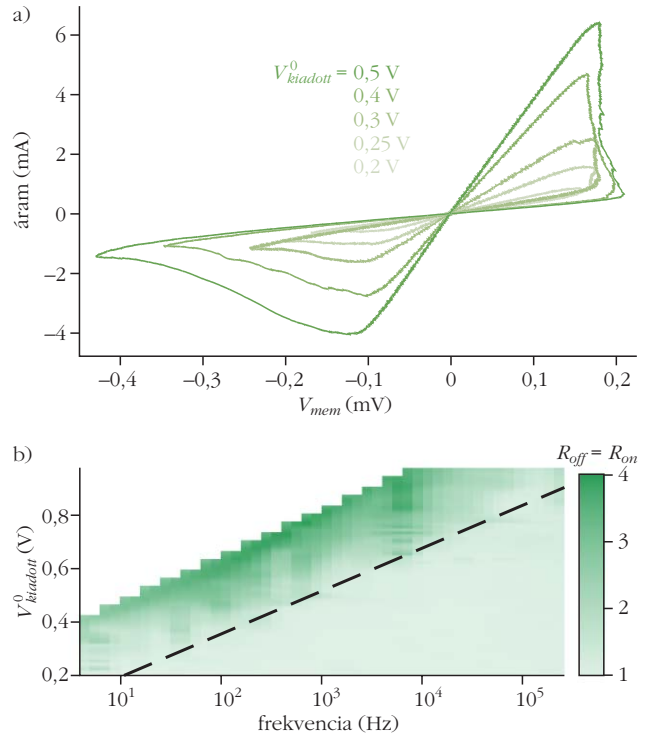
$$V = a \log f + b \quad (3)$$

amplitúdó-frekvencia kapcsolatot jelöli ki (az a és b az adott memrisztorra jellemző paraméterek). Tehát, ha lineárisan növeljük a feszültséget, akkor a kapcsolási folyamat exponenciálisan felgyorsul.

Az alkalmazások szempontjából is nagyon fontos tulajdonság, hogy a kapcsolási idő ennyire érzékenyen függ a meghajtás nagyságától. Emiatt néhány voltos feszültség hatására gyorsan tudunk írni, azonban az aktuális értéket tizedvoltos feszültségeken kiolvastva még sokkal hosszabb idő alatt sem okozunk változást. Valamint ez a tulajdonság teszi alkalmassá a memrisztorokat a neurális hálózatok építésére, amiről a következő fejezetben olvashatunk.

Neurális hálózatok

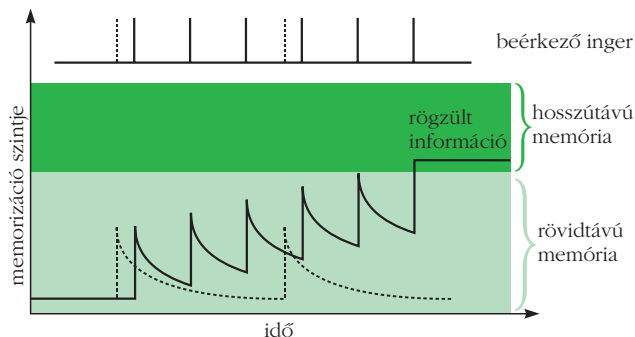
Az emberi idegrendszer legkisebb egysége a neuron, amit egy idegsejt és annak nyúlványai alkotnak. Feladata az ingerfelvétel és az ingerületvezetés. A két neuron közti kapcsolatot, és azt a térrészt, ahol



4. ábra. a) Feszültség-áram karakterisztikák egyre növekvő amplitúdóval. b) Az ellenállás-változás aránya a meghajtó háromszögjel frekvenciájának és amplitúdójának függvényében.

az információáramlás lezajlik, szinapszisnak nevezük. Az átáramló információt kémiai anyagok vagy elektromos jelek továbbíthatják, ettől függően beszélhetünk kémiai vagy elektromos szinapszisoról. Az előbbi körülbelül 20-30 nm, míg az utóbbi mérete 2-3 nm közötti. Ha egy szinapszis kémiai vagy elektromos vezetőképessége nagy, akkor az általa összekötött neuronok között erős kapcsolat van. Az emlősök központi idegrendszerét kémiai szinapszisok alkotják, elektromos szinapszis például a szív izmaira jellemző. A neurális hálók memrisztorokkal történő modellezése során a szinapszisok kémiai vagy elektromos vezetőképességét a memrisztorok elektromos vezetőképességével azonosítjuk. A külső ingert a memrisztorra kapcsolt feszültség, vagy a rajta átfolyó áram jelenti. Azért nagy jelentőségű, hogy a memrisztorok vezetőképessége analóg módon változik, mert a szinapszisok erőssége is folytonosan hangolható.

Az emberi agyat tekintve megkülönböztethetünk rövid- és hosszútávú memóriát. A rövidtávú emlékezés esetén a neuronok közti szinapszis vezetőképessége csak ideiglenesen erősödik meg, míg a második esetben hosszútávú a változás. Egy új információ érkezésekor, ha az inger erőssége nagy, az információ rögtön a hosszútávú memóriába kerül. Azonban, ha az inger nem elég erős, akkor a szinapszis vezetőképessége valamilyen függvény szerint lecsökken, és visszaáll kiindulási állapotába (5. ábra, szaggatott vonal). Abban az esetben, ha a vezetőképesség még nem csökkent le teljesen, és újabb inger éri a szinapszist, akkor az információ felerősödik. Így kicsi, de



5. ábra. Különböző ingerek hatására az emberi memóriában lezajló változás. Szaggatott vonal: ritkán ismételt ingerek között az információ elfelejtődik. Folytonos vonal: gyorsan ismételt ingerek hatására az információ rögzül.

ismétlődő ingerekkel is képesek vagyunk memorizálni valamit, ha a lecsengés elegendően hosszú időskálára terjed ki (5. ábra, folytonos vonal). A „lassú felejtés” szükséges feltétele annak, hogy a téves vagy felesleges információk eltűnjenek. Az agykutatók körében ismert, hogy a felejtés nem egy egyszerű exponenciális lecsengés, hanem a mérhető jel időben több nagyságrenden keresztül is megmarad.

Az általunk vizsgált Ag_2S memrisztor „gyorsan írható – lassan felejtő” memóriaként működik (3. ábra). Az ismétlődő pulzusok hatására bekövetkező tanulási folyamat miatt memrisztorokon alapuló mesterséges intelligencia alkalmas lehet nagy erőforrás-igényű számítástechnikai feladatok új elveken történő, gyors és hatékony elvégzésére (például a mintázatfelismerés). Agykutatói alkalmazási lehetőséget jelent a szinapszis által összekötött neuronok bonyolult kapcsolat

látat leíró úgynevezett plaszticitási függvény (spike timing dependent plasticity – STDP) tanulmányozása memrisztorokból készített hálózatok segítségével.

Összefoglalás

A fent bemutatott eredmények alapján elmondható, hogy az ezüst-szulfidban kialakuló fémes, néhány nanométer átmérőjű vezető szálak ellenállása folyamatosan változtatható nanoszekundum alatti időskálán. A kis méret és a memóriával analóg viselkedés lehetővé teszi, hogy gyors és kompakt memóriát építsünk ezüst-szulfidon alapuló cellák hálózatából. A különleges dinamikai tulajdonságok miatt az Ag_2S memrisztorok nemcsak számítógépes adattárolásra, de új típusú „felejtő” neurális hálózatok építésére is alkalmasak.

Irodalom

- A. Gubicza, D. Zs. Manrique, L. Pósa, C. J. Lambert, G. Mihály, M. Csontos, A. Halbritter: Asymmetry-induced resistive switching in $\text{Ag-Ag}_2\text{S-Ag}$ memristors enabling a simplified atomic-scale memory design. *Scientific Reports* 6 (2016) 30775.
- A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály: Non-exponential resistive switching in Ag_2S memristors: a key to nanometer-scale non-volatile memory devices. *Nanoscale* 7 (2015) 439.
- A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály: Resistive switching in metallic Ag_2S memristors due to a local overheating induced phase transition. *Nanoscale* 7 (2015) 11248.
- A. Geresdi, M. Csontos, A. Gubicza, A. Halbritter, G. Mihály: Fast operation of nanometer-scale metallic memristors: highly transparent conductance channels in Ag_2S devices. *Nanoscale* 6 (2014) 2613.
- A. Geresdi, A. Halbritter, A. Gyenis, P. Makk, G. Mihály: From stochastic single atomic switch to nanoscale resistive memory device. *Nanoscale* 3 (2011) 1504.

NEUTRONCSILLAGOK EXTRÉM ANYAGÁNAK VIZSGÁLATA ÚJ TÉRELMÉLETI MÓDSZEREKKEL

Pósfay Péter – MTA Wigner FK RMI, ELTE TTK
 Barnaföldi Gergely Gábor – MTA Wigner FK RMI
 Jakovác Antal – ELTE TTK Fizikai Intézet

Kompakt égi objektumoknak nevezzük a nagy tömegű csillagvégállapotokat, amelyek fehér törpék, neutron- vagy kvarkcsillagok, esetleg fekete lyukak [1]. Ezek mindegyikének elméleti leírása újabb és újabb fizikai és matematikai modelleket, megoldási technikákat kíván mind analitikus, mind numerikus oldalról. Ennek oka alapvetően abban keresendő, hogy két olyan fizikai modell együttes alkalmazása szükséges

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni az NKFIH OTKA K120660, K104292, K104260 pályázatoknak, valamint az MTA NKM-81/2016 MTA-UA bilaterál mobilitási programnak. Barnaföldi Gergely Gábor és Pósfay Péter köszönettel tartozik a NewCompStar (MP1304) és THOR (CA15213) COST akciópályázatok nyújtotta támogatásért.

az elméleti leírások során, amelyek értelmezési tartományai nehezen összeegyeztethetők. E két modell a geometriai alapú, lokálisan a téridő szerkezetét meghatározó gravitációelmélet, valamint mikroszkopikus kvantumvilágot leíró kvantumtérelmélet. Míg előbbi nagy skálájú viselkedést modellez lokálisan, erősen görbült téridőben, az utóbbi a mikrovilág sík téridőbeli „globális” leírására épül. A statisztikus termodinamika beillesztése ebbe a kettős leírásba további nehézségeket teremt.

Kutatásunk célja a neutroncsillagok (1. ábra) belső szerkezetének modellezése, amely mindmáig nagy kihívást jelent: (i) hiszen földi körülmények között nem állítható elő e kompakt csillagbelső – a feltétele-