



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

TDK DOLGOZAT

Neurális dinamikát megvalósító memrisztor alapú detektoráramkör megvalósítása

Kövecs Antal Roland

TÉMAVEZETŐK: TÖRÖK TÍMEA ÉS MOLNÁR DÁNIEL
DOKTORANDUSZ HALLGATÓK
BME FIZIKAI INTÉZET
FIZIKA TANSZÉK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A rezisztív kapcsoló memóriák bemutatása	6
2.1. A kapcsolási jelenségek mechanizmusai	6
2.1.1. A vegyértékállapot-változás mechanizmus	7
2.1.2. Szigetelő-fém átmenettel járó rezisztív kapcsolat	9
2.2. Memrisztormodellek	10
2.2.1. VCM mechanizmus matematikai leírása	11
2.2.2. A szigetelő-fém átmenet kvalitatív leírása illékony memóriáknál .	12
3. Neuronok fiziológiájának modellezése memrisztorokkal	14
3.1. A neuronok felépítése és működése	15
3.2. Jelenlegi törekvések	16
4. A Ta₂O₅ memrisztor vizsgálata	18
4.1. Memória jelenségek a Ta ₂ O ₅ memrisztorban	22
5. A VO₂ memrisztor vizsgálata	27
5.1. A VO ₂ memrisztor oszcillációja	27
5.2. A VO ₂ stabilitás vizsgálata	28
6. A memrisztorok összekapcsolása	32
7. A detektoráramkör megvalósítása	38
7.1. A mérési eljárás	39
7.2. Az áramkör továbbgondolása	42

7.3. Kitekintés, a detektor áramkör alkalmazási lehetőségei	45
8. Összefoglalás	48

1. fejezet

Bevezetés

A mai automatizált világban hatalmas hangsúlyt kap a számítógépek gyorsasága, skálázhatósága. Az hálózatra kötött hordozható eszközök egyre elterjedtebbek a hétköznapi életünkben, és a robotika világának rohamos fejlődése is folyamatos fejlesztéseket követel a technológiai ipartól. A társadalomnak szüksége van az integrált áramkörök sebességének, és kapacitásának növelésére, viszont a fizika törvényei, illetve a jelenleg használt Neumann-típusú számítógép architektúrák gyakran korlátot szabnak a növekedési lehetőségeknek. Utóbbi a fizikailag szeparált CPU és tárhely közötti adatközvetítés alacsony átviteli sebessége miatt problémás. A kapacitásnövelés szempontjából pedig az integrálhatóság, és az energiafogyasztás a legégetőbb kérdések.

Gordon Moore, az Intel alapítótagja 1965-ben tett egy jóslatot, miszerint, az integrált áramkörökben alkalmazott tranzisztorok száma nagyjából kétévente kétszereződni fog. A jóslatot azóta Moore-törvényeként tartják számon. Az utóbbi években viszont elmondható, hogy a törvény a határához közeleg, hiszen a technológia elérte azokat a 10 nm-es mérettartományokat az integrált áramkörök területén, ahol már figyelembe kell vennünk az anyag atomi felépítéséből adódó korlátokat. Ezt főként a megnövekedett számú memóriaegységek miniatürizálásának lehetőségeiben lévő korlátot jelenti. Így a Neumann-típusú számítógépek kommunikációs szűk keresztmetszete, és a Moore-törvény lassulása miatt egyre növekedik az új típusú memóriák és számítási egységek kutatására irányuló törekvések száma az elektronikai ipar számos területén.

Mindezekre a problémákra jelenthet megoldást, ha a millió éves evolúciós folyamatok során egyre hatékonyabbá és kompaktabbá fejlődött biológiai agyat vennénk alapul a

radikálisan újfajta számítási paradigmák kifejlesztésének. Az idegtudományi kutatások eredményeit felhasználva építhetnénk olyan számítógép architektúrákat, amik az agyi működéshez hasonlóan lokálisan, és párhuzamosan végzik a számításokat, és tárolják el azokat neuron-szinapszis kapcsolatok formájában. Sokak szerint érdemes a jelenlegi Neumann-típusú architektúrákat a neurológiai struktúráknak megfelelően, skálázható neuron-szinapszis hálózatokkal helyettesíteni. Ezek a neuromorfikus (a biológiai agyhoz hasonló architektúrájú és működési elvű) rendszerek kompakt méretük, és hatékony energiafogyasztásuknak köszönhetően megfelelő alternatívát nyújthatnak a jelenlegi, lassuló trendben fejlődő technológiai megoldásoknak, ezzel kielégítve a társadalmi szükségleteket. A jelenleg is elterjedt tervezérelt tranzisztorokkal és kondenzátorokkal már hosszabb ideje képesek vagyunk neuron-szinapszis kapcsolatok működését szimulálni. Ezek a megoldások viszont hatalmas komponens- és energiaigénnyel rendelkező, viszonylag komplex áramköröket igényelnek, ami sok esetben problémát jelenthet az integrálhatóság és a nagy hálózatokká skálázhatóság során.

A nagysűrűségű integrálhatóság, az energiatakarékosság és skálázhatóság szempontjából a nanométer méretskálájú memrisztorok használata, mint fundamentális építőelem megoldást jelenthet az új típusú neuromorfikus számítási architektúrák megvalósítására [1]. A memrisztorok olyan, rendszerint fém-szigetelő-fém nanoskálájú struktúrák, amik ellenállállása a rájuk kapcsolt feszültséggel változtatható. A memrisztorokkal lehetséges az idegsejtekhez hasonló rövid- és hosszútávú memóriát megvalósítani. Emellett az úgynevezett tüzelési gyakoriságtól függő plaszticitásuk lehetővé teszi őket, hogy a megfelelő neurális hálózatok építőelemeként alkalmazzuk [2, 3, 4] (az utóbbi két tulajdonságról bővebben a 3. fejezetben olvashatunk). Kutatásom során is megfigyelhettem a Ta_2O_5 memrisztorok neuronokhoz hasonló viselkedését a megfelelő kapcsolási környezetben.

A kutatásom során az említett neurális dinamikákat, illetve a memrisztorok egyedi áramköri tulajdonságait ötvözve vizsgáltam egy azokat implementáló detektoráramkör megvalósíthatóságát, tulajdonságait. A cél egy zajos háttérben lévő feszültségimpulzus detektálása, és egy erre adott konkrét válasz kiváltása volt. Ehhez egy Ta_2O_5 és egy VO_2 memrisztor tulajdonságait és alkalmazhatóságait vizsgáltam a kitűzött feladat szempontjából. Meghatároztam az említett memrisztorok kapcsolási paramétereit, illetve

szimuláltam azok lehetséges együttes működését. A szimulációk eredményeképpen kapott áramköri paramétereket később értelmeztük, majd gyakorlatba ültettük.

A kutatás végén témevezetőimmal sikeresen össze is állítottuk a kitűzött kapcsolást, ezzel demonstrálva a memrisztorok egy újfajta alkalmazási lehetőségét.

2. fejezet

A rezisztív kapcsoló memóriák bemutatása

A memrisztor olyan passzív áramköri elem, aminek ellenállása függ a rajta átfolyt töltés nagyságától. Ez a függés megvalósulhat a rákapcsolt jel frekvenciájának, és annak amplitúdójának nagyságától is. Feszültség-áram karakterisztikájában hiszterézis figyelhető meg, ami miatt azok memóriaként viselkedhetnek.

A memrisztorok jelentőségét már az előző évszázadban felismerték. A legjelentősebb kutatások Leon Chua nevéhez fűződnek a témában [5, 6, 7]. A memrisztorok kutatása viszont csak azután kezdett el növekedni, miután a HP mérnökei sikeresen demonstrálták az első, fizikailag is memrisztor dinamikával rendelkező jelenséget [8]. A memrisztor a negyedik áramköri elem az ellenállás, kondenzátor és tekercs mellett.

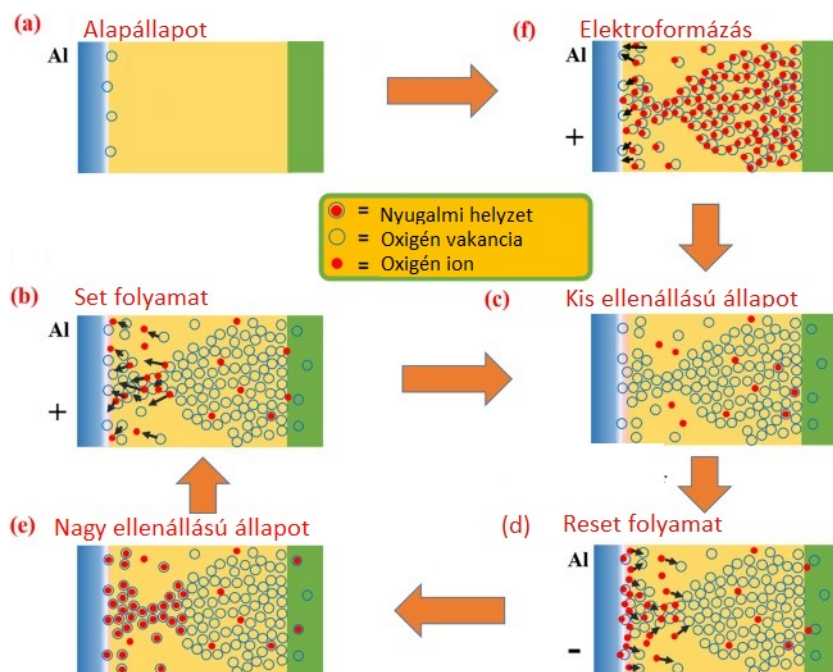
2.1. A kapcsolási jelenségek mechanizmusai

A memrisztorok nemlineáris áram-feszültség karakterisztikájának oka azok belső struktúrájának fizikai megváltozása a rájuk kapcsolt feszültség megváltozásának hatására. Fontos tulajdonságuk még, hogy illékony, vagy nem-illékony memória tulajdonságokat is mutathatnak az anyagösszetételüktől függően. Az illékony memóriák a rájuk kapcsolt feszültség hiányában visszaállnak eredeti állapotukba (a vizsgált memrisztorainknál ez nagy ellenállást jelent). Ezzel szemben a nem-illékony memóriák külső feszültség nélkül is megőrzik állapotukat, azt megváltoztatni csak rákapcsolt feszültséggel lehet. A mem-

risztorok egyik fizikai megvalósítási lehetősége a fém-oxidok használatán alapul. Ezek során két fémelektróda közé egy fém-oxid réteg van elhelyezve. A rezisztív kapcsolási jelenség a két elektróda között lévő anyag vezetőképesség változásának az eredménye. A vezetőképesség megváltozásának egyik lehetséges változata az anyagok fázisváltozása. Ennek lényege, hogy a korábban szigetelőként viselkedő anyag valamilyen külső hatásra vezetővé válik. A külső hatások lehetnek hőmérséklet- vagy nyomásváltozás, illetve félvezetők esetében azok szennyezettségének megváltozása.

2.1.1. A vegyértékállapot-változás mechanizmus

A félvezetők esetében a szennyezettségváltozás alapja, hogy a kapcsolat előtt szigetelő állapotban lévő fém-oxidban vezető csatornák, úgynevezett filamentumok alakulnak ki az eszközre kapcsolt feszültség hatására [9]. Egyik magyarázata a memrisztorokban lévő vezető filamentumok kialakulásának a vegyértékállapot-változás (VCM - Valence Change Mechanism). A VCM a fém - fém-oxid - fém struktúrák jellemző kapcsolási mechanizmusa. Ennek lényege, hogy a külső tér hatására anion migráció következik be a memrisztorban, és ez változtatja meg az anyag sztöchiometriáját. Az anionmigráció fém-oxidok esetében általában oxigén vakanciák helyváltoztatását jelenti. VCM mechanizmus történik az általunk pulzusdetektálásra alkalmazott Ta_2O_5 memrisztorokban is, emellett még a kutatócsoportunk által korábban vizsgált Nb_2O_5 [10], a TiO_2 és a ZnO fémoxidokban is. A jelenséget remekül szemlélteti a következő ábra.



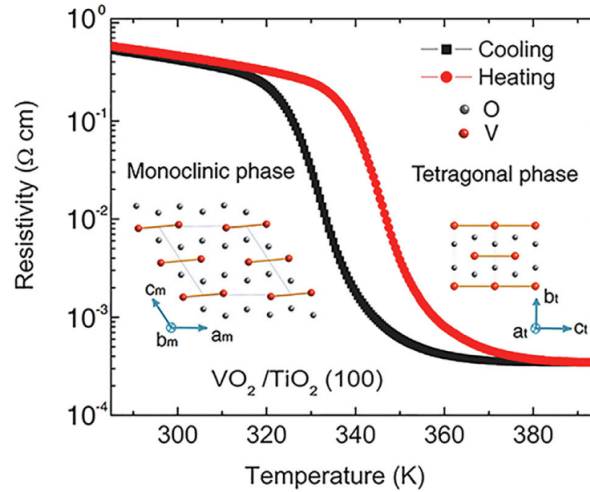
2.1. ábra. A VCM mechanizmus sematikus ábrázolása.[11]

A kezdeti állapotban egyensúlyban van a rendszerünk (a). Ha feszültséget kapcsolunk a memrisztor elektródáira, akkor a feszültség hatására a negatív töltésű oxigén ionok az úgynevezett aktív rétegből a pozitív elektróda felé vándorolnak (b), amik következtében egy oxigén vakanciákból álló vezető filamentum alakul ki a két elektróda között (c). A vezető filamentum jelenléte alacsony ellenállásúvá teszi az eszközt, amit az ON állapotnak hívunk, magát folyamatot pedig SET-nek nevezik. Az elektródákra kapcsolt feszültség irányát megfordítva az oxigén ionok újra mozgásba kényszerülnek, de ezúttal vissza az aktív réteg felé (d). Ott rekombinálnak a vakanciákkal, és a megfelelő nagyságú vakanciacsökkenés után a vezető filamentum megszakad, így az eszköz nagy ellenállású állapotba kapcsol (e). A folyamat neve RESET, és OFF állapotba kapcsoljuk ilyenkor a memrisztort. Fontos kiemelni, hogy ebben az esetben a memrisztor nagy-, illetve kis ellenállású kapcsolása ellentétes előjelű feszültségen történik. Ebből kifolyólag a kapcsolást *bipolárisnak* hívjuk. Néhány VCM alapú memrisztor esetében az első használatkor úgynevezett elektroformázást kell alkalmaznunk, hogy kialakítsuk a vezető csatornát (f). Bizonyos feltételezések szerint a formázás során történő strukturális változásokkal magyarázható a vezető filamentumok létrejötte a fémoxid memrisztorok szigetelő rétegében. [9]. A formázás során nagy feszültséget kapcsolunk a memrisztor két elektródája közé.

A VCM alapú memrisztoroknál a formázási lépés azért szükséges, mert az anionmigráció során több filamentumkezdemény is kialakulhat, és a formázás során egyetlen, nagyobb vezető csatorna kialakítását segítjük így elő. A gyakorlatban az elektroformázást egyre nagyobb amplitúdójó ms nagyságrendű négyszögjelekkel csináltuk. Az egyes négyszögjel pulzusok után alacsonyabb feszültséggel lemértük azok ellenállását, hogy csak a kellő mértékig növeljük a cellákon eső feszültséget, nehogy visszafordíthatatlan károsodást okozzunk rajtuk (ilyen lehet például a kristály szétesése az átütési feszültség miatt).

2.1.2. Szigetelő-fém átmenettel járó rezisztív kapcsolás

A memrisztorok ellenállás változásának egy másik lehetséges fizikai megvalósulása a Mott-átmenet folyamata következtében kialakuló szigetelő-fém állapotváltozás (IMT- insulator to metal transition) [12]. A félvezetőkben alacsonyabb hőmérsékleteken az anyag atomcsoportjai bizonyos számú elektront tartalmaznak, és elektromosan semlegesek. Ahhoz, hogy egy elektron kitörjön egy ilyen csoport potenciáljából, az őt "visszahúzó" Coulomb-erőt legyőző mozgási energiára kell szert tennie. Ha a hőmérséklet elég magas ahhoz, hogy az egyes csoportok legalább $\frac{1}{2}k_bT$ energiával rendelkezzenek, akkor a Boltzmann eloszlás alapján az elektronok jelentős részének elég energiája lesz ahhoz, hogy kiszabaduljon az atomcsoport potenciáljából, és részt vehessen a vezetési folyamatokban, maguk mögött egy pozitív lyukat hagyva, megváltoztatva az anyag kristályszerkezetét. Ezek alapján alacsony hőmérsékleten az anyag szigetelő, magasabb hőmérsékleten pedig vezető lesz. A folyamat struktúráisan egy monoklin-tetragonális kristályszerkezet transzformációként magyarázható VO₂ esetén. Tehát a monoklin állapotában az eszköz nagy ellenállású, tetragonális állapotában pedig kisebb ellenállása van. Így egy két állapotú rendszert valósít meg.



2.2. ábra. A szigetelő-fém mechanizmus sematikus ábrázolása. [13]

Az állapotváltozást az atomcsoportok fűtésével érhetjük el, amit praktikusán Joule-hő formájában is közölhetünk. Tehát a két elektróda közé helyezett Mott-átalakulást mutató anyagra feszültséget kapcsolva az elektromos áram hatására a lokálisan megnövekvő hőmérséklet ott "megolvasztja" az anyagot, és megváltozik annak kristályszerkezete, ahogy a (2.2.) ábrán is látható. A sematikus rajzon megfigyelhetjük, hogy a hűtési és fűtési folyamatok által okozott változás az anyag ellenállásában hiszterézis görbét mutat. Ez biztosítja a memrisztorokra jellemző egyedi feszültség-áram karakterisztikát.

2.2. Memrisztormodellek

A memrisztor alapú alkalmazások fejlesztéséhez szükségünk van egy megfelelő modellre, hogy szimulálni és elemezni tudjuk a rendszerünket. Ebben az alfejezetben bemutatom a szimulációim során alkalmazott memrisztormodelleket. A Ta_2O_5 memrisztor és VO_2 memrisztor eltérő kapcsolási mechanizmussal rendelkezik, így az azok viselkedését eltérő modellekkel kell leírunk. A kutatócsoportunk által használt modellek egyszerűek, főként fenomenologikusan írják le az alkalmazott memrisztoraink viselkedését. Léteznek problémáspecifikusabb modellek is a memrisztív kapcsolási jelenségek leírására a vizsgált minták felépítésétől függően [14]. Ezek a modellek több paramétert is figyelembe vesz-

nek, viszont a kutatásom során ezekre nem volt szükség, hiszen így is megfelelően tudtuk modellezni a kívánt áramköri viselkedéseket a nekünk kellő pontosságig.

2.2.1. VCM mechanizmus matematikai leírása

A kutatócsoportunk már korábban is végzett szimulációkat a memrisztorok modellezésével kapcsolatban. Balázs Péter egy korábbi munkájában a csoport kísérleti eredményeire építve írta le a VCM alapú memrisztorok viselkedését [15]. A modell a fémionok által felépített vezető filamentumok megváltozásának mechanizmusával írja le a fém-oxid memrisztorok ellenállásának feszültség-idő függését. A modell a következő összefüggésekkel írja le a Ta_2O_5 memrisztor dinamikáját a rákapcsolt feszültség frekvenciájától és amplitúdójától függően:

$$R_m = xR_{on} + (1 - x)R_{off} \quad (2.1)$$

ahol R_m a memrisztor ellenállása, R_{on} és R_{off} az ON és OFF állapotú ellenállások értékei. Az x pedig egy belső változó, amit a következő differenciálegyenletekből kapjuk:

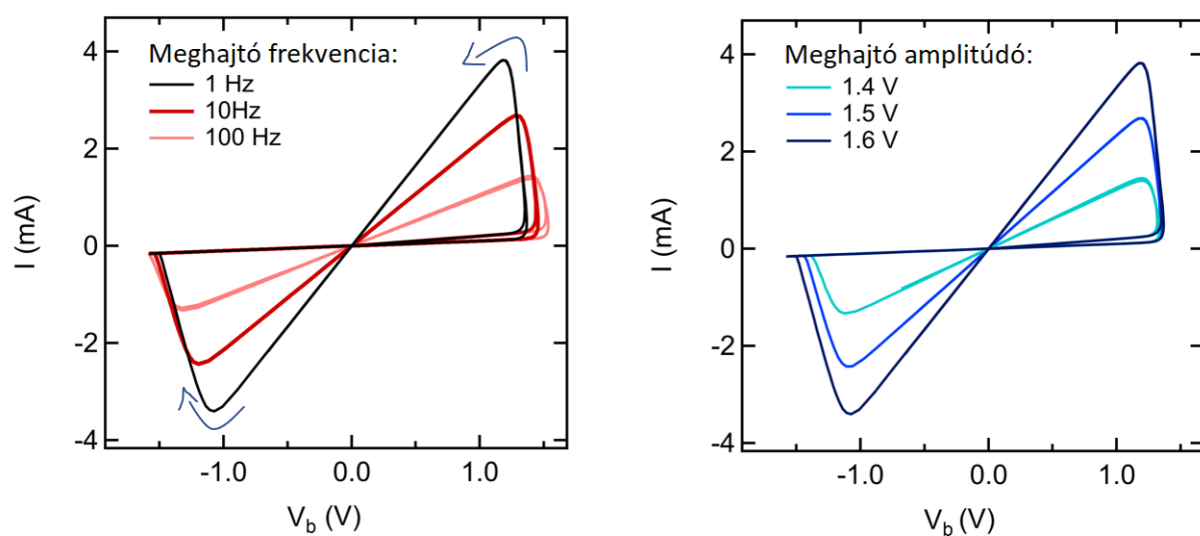
$$x' = \frac{x^{k+1}}{\tau} \quad V_b < 0 \quad (2.2)$$

$$x' = \frac{(1 - x)^{k+1}}{\tau} \quad V_b > 0 \quad (2.3)$$

ahol V_b a bias-, vagy előfeszítési feszültség, τ pedig a kapcsolás időállandója, ami a Ta_2O_5 esetében az oxigén vakanciák vándorlásának sebességétől függ:

$$\tau = 10^{\frac{|V_b| - c}{a}} s \quad (2.4)$$

A kapcsolás időállandója az úgynevezett feszültség-idő dilemma miatt bír fontos szereppel. Ennek lényege, hogy a kapcsolás sebessége exponenciálisan függ a memrisztorra kapcsolt V_b feszültségtől. A memrisztoroknak ezt a tulajdonságát az ON és OFF állapoti ellenállásainak arányával jellemezzük [16]. A (2.4.) egyenletben látható, hogy az alkalmazott modellünk is ezt produkálja. A modellt szimulációval is vizsgáltuk, aminek eredménye a (2.3.) ábrán látható. A szimulációs görbék nagyságrendileg megfeleltek a (4.5.) ábrán látható valós mintákon mért görbéknek. A modellhez szükséges paramétereket a valós mintákon mért kapcsolások paramétereiből nyertük.



2.3. ábra. A Ta_2O_5 memrisztorok modelljének feszültség-idő dilemmáját bemutató szimulációs eredmények. Állandó frekvenciájú mellett, a jel feszültségamplitúdójának növelésével az R_{off}/R_{on} arány monoton nő. Ezzel szemben az állandó amplitúdójú háromszögjelek frekvenciáját növelve az arány monoton csökken. A kapcsolás irányát nyilak jelölik.

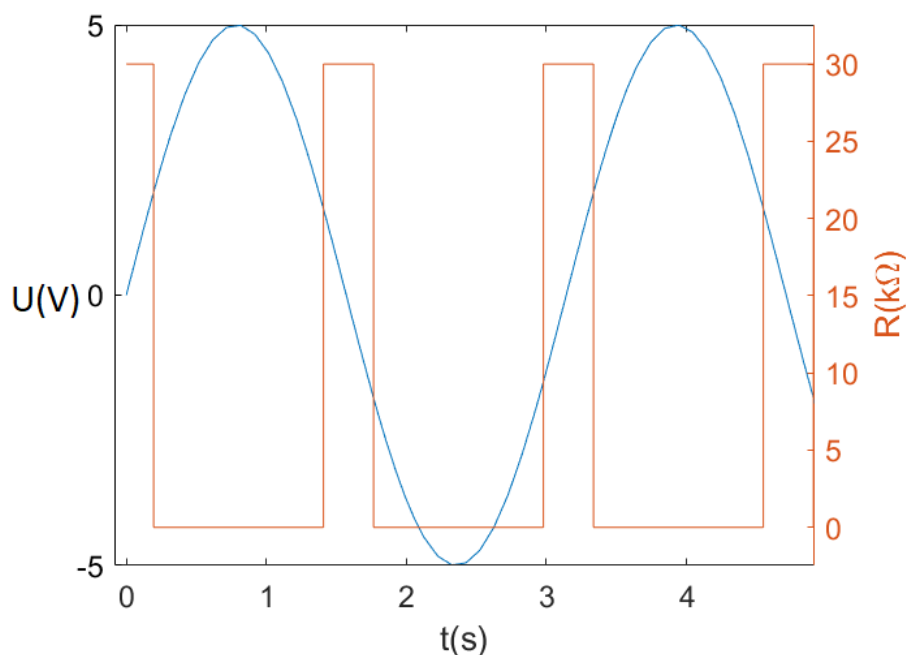
2.2.2. A szigetelő-fém átmenet kvalitatív leírása illékony memóriáknál

Az szilárdtestekben megfigyelhető szigetelő-fém átmenet bonyolult folyamat, aminek részletei még nem teljesen tisztázottak. A jelenlegi modellek túl bonyolultak a szimulációkhoz, ezért egy egyszerű kétállapotú rendszerként modelleztük a VO_2 memrisztorok Mott-átmenet jelenségével megvalósuló ellenállásváltozásának dinamikáját. A leírásunk tapasztalati tényekre alapozva a pozitív V_+ és negatív V_- feszültségű elektródái között

mért feszültséget vizsgálva állapítja meg, hogy a memrisztor nagy ellenállású (OFF, nyitott) vagy kicsi ellenállású (ON, zárt) állapotban van-e. A kapcsolást kísérletileg kimért kapcsolási küszöbfeszültségek (V_{nyit} , $V_{zár}$) alapján végezzük az alábbiak alapján:

$$|V_+ - V_-| < V_{nyit} \implies \text{zárt} \rightarrow \text{nyitott (ON} \rightarrow \text{OFF)}$$

$$|V_+ - V_-| > V_{zár} \implies \text{nyitott} \rightarrow \text{zárt (OFF} \rightarrow \text{ON)}$$



2.4. ábra. Szimuláció a VO_2 memrisztor modell ellenállásának kapcsolásáról a rákapcsolt feszültség hatására. Az ábrán látható szimulációban $V_{nyit} = 4 \text{ V}$, a $V_{zár} = -4 \text{ V}$ volt, az ON állapotú alacsony ellenállás a szimuláció kedvéért $1 \text{ } \Omega$, az OFF állapotú nagy ellenállás pedig $30 \text{ k}\Omega$ volt

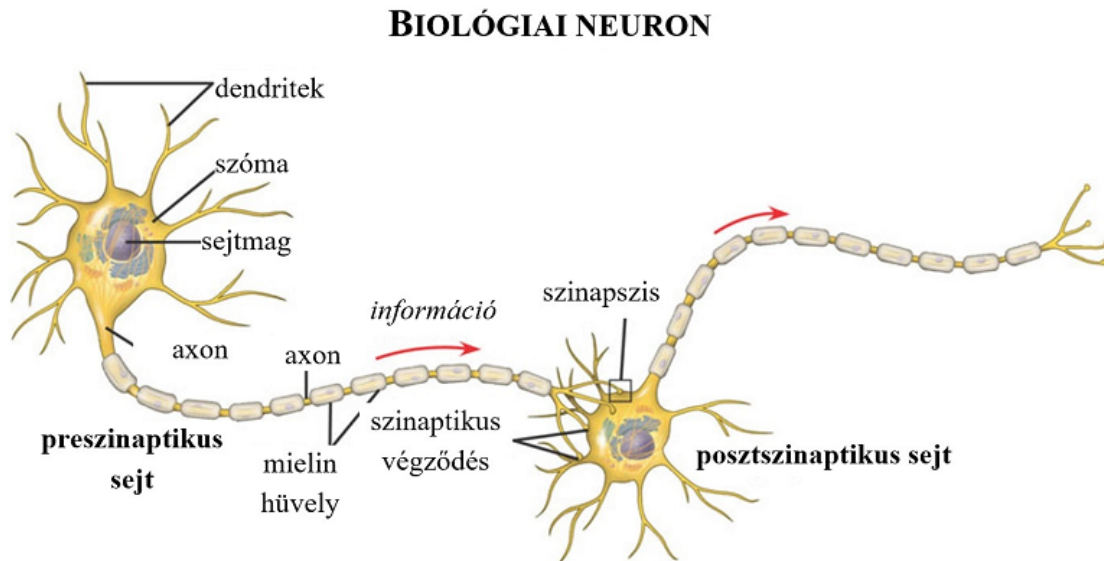
A nyitó és záró kifejezéseket az áramkörök nyitásával és zárásával analogizáljuk. Nyitott állapotban a memrisztor nagy ellenállású OFF állapotban van. Ha ekkor rajta a $V_{zár}$ -nál nagyobb feszültség esik, akkor bezár, alacsony ellenállású ON állapotba kapcsol. Zárt állapotban a memrisztor alacsony ellenállású ON állapotban van. Az előző esethez hasonlóan, ha ekkor rajta V_{nyit} -nál kisebb feszültség esik, akkor az az illékony-memória tulajdonsága miatt visszakapcsol nagy ellenállású OFF állapotba (kinyit).

3. fejezet

Neuronok fiziológiájának modellezése memrisztorokkal

A neuronok az idegrendszer alapvető egységei. Ők valósítják meg az élő rendszerek érzékelését, nekik köszönhetően képesek a biológiai rendszerek kapcsolatot teremteni a külvilággal és miattuk tudjuk ezt elolvasni. Többféle neuron létezik az eltérő feladatok ellátására: vannak érzékelők, amik a külvilágból érkező ingereket először dolgozzák fel, motoros neuronok, amiknek a mozgásban van fontos szerepük, léteznek még úgynevezett interneuronok is, amik különböző idegsejt csoportokat kapcsolnak össze, például az agyat a gerincvelővel, az érzékelő neuronokkal, vagy az izmokat vezérlő motoros neuronokkal.

3.1. A neuronok felépítése és működése



3.1. ábra. Az idegsejt felépítése [17]

A neuronok elsődleges funkciója az idegrendszerben terjedő jelek továbbítása és megfelelő feldolgozása. A sejt életfunkcióinak fenntartásáért a sejttestet alkotó szóma és a sejtmag felelős. Az idegsejtbe az úgynevezett dendritekbe érkezik a jel, amit a sejttest feldolgoz, majd az axonon keresztül továbbít egy másik idegsejt felé annak dendritjével összekapcsolódva. A jel az axonon keresztül úgynevezett akciós potenciál formájában terjed, ami az axonban és a sejten kívüli állományban lévő ionkoncentráció gradiens eredményeképpen jön létre. A folyamatot a neuron tüzelésének hívjuk, és fontos szerepet játszanak benne a sejtmembránon lévő ioncsatornák. Az axon a dendritnek a szinapszison keresztül kapcsolódva adja tovább az információt ingerületátvivő anyagok segítségével, amik kémiai vegyületek formájában vannak jelen. Az idegi memória jelenségek ezen szinaptikus kapcsolatok "erősségének" köszönhetőek. Ha gyakran használunk egy bizonyos területen lévő idegsejt csoportot, ott sokszor fog aktiválódni a szinaptikus kapcsolat. A többszöri aktiváció során az úgynevezett szinaptikus plaszticitás következtében ott megerősödik a szinapszis, és könnyebben fog a jövőben aktiválódni az az idegi útvonal. A jelenség történhet rövid-, illetve hosszútávon is a bemeneti inger paramétereitől függő-

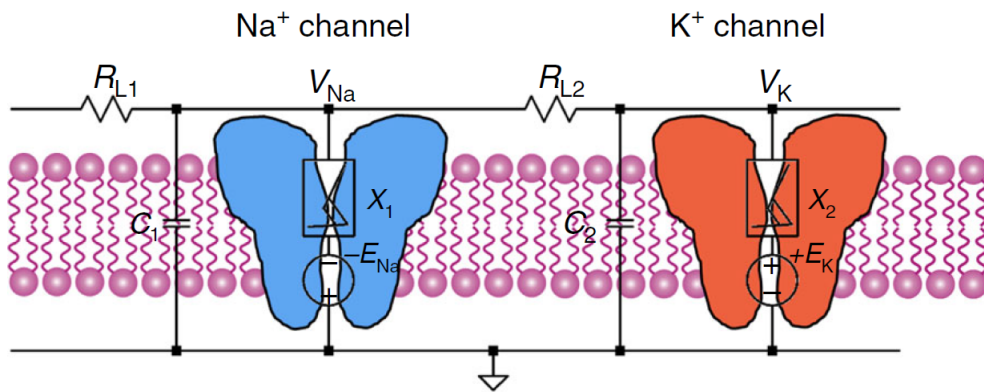
en [18]. A későbbiekben a szinaptikus plaszticitásra rövid- és hosszútávú memóriaként hivatkozom.

A jelterjedés a jelet érzékelő neurontól az interneuronokon át egészen a magasabb agyi feldolgozó területekig keresztülmenő idegi útvonalon történik. Egy neuron a beérkező jelre válaszul maga is egy jelet bocsát ki. Ha a neuronba közvetlenül annak tüzelése előtt érkezik egy jel, akkor a tapasztalatok alapján a kimeneti jel erősebb lesz. A jelenséget tüzelési gyakoriságtól függő plaszticitásnak hívjuk magyarul. [4]

A neuronok működésének megértése fontos szereppel bír azok rendellenes viselkedéseinek gyógyításában, kezelhetőségében. Sok neuron fiziológiája még mindig nem pontosan ismert, a legfőbb idegtudományi akadályt a komplex, több ezer neuronból álló rendszerek viselkedésének leírása képezi. Az idegsejtek működésének leírását matematikai modellekkel tehetjük meg. A legelterjedtebb modell a Hodgkin–Huxley modell. [19] A modell egyszerű elsőrendű differenciálegyenletekkel írja le az idegsejtek akciós potenciáljának terjedésének időfüggését. A komplex neurális folyamatok modellezhetőségének alapja az egyes neuronok viselkedésének megfelelő leírása. Ezt megtehetjük az őket leíró differenciálegyenleteket megoldó programok segítségével, vagy modellezhetjük azok működését hasonló dinamikával rendelkező eszközök segítségével. Előbbi egy sok komponenst tartalmazó rendszer esetében hatalmas számításigényű, ebből kifolyólag pedig energiaigényes folyamat. Utóbbira jelenthet megoldást az energiahatékony, könnyen integrálható memrisztorok használata.

3.2. Jelenlegi törekvések

Chua és társai [20] megmutatták, hogy a neuronok Hodgkin Huxley modelljének leírásában szereplő differenciálegyenletek kaotikussá válása okozza a neuronok tüzelését. Ezt felhasználva egy negatív differenciális ellenállással bíró memrisztorral lehetséges a neurális dinamikák modellezése. Ennek megvalósítási módjairól bővebben olvashatunk a [21] forrásban, ahol a kutatók VO_2 memrisztorokat használtak megfelelő kapcsolásokban, hogy valós, adott neurontípusokra jellemző választ produkáljanak bizonyos bemeneti jelekre. Egy ilyen kapcsolást mutat a (3.2.) ábra is.



3.2. ábra. Az idegsejtek Na^+ és K^+ ioncsatornáit tartalmazó membránt, és annak dinamikáját modellező memrisztorkapcsolás, amiben a memrisztorokat X_1 és X_2 -vel jelölve találhatjuk. A membránpotenciálért egyenfeszültség-források felelősek, a membránok kapacitását pedig kondenzátorok valósítják meg. [21].

A kutatásban teljesen steril, csupán a tüzelést kiváltó bemeneti jelet alkalmaztak a kutatók. Nyilvánvalóan egy bizonyos hibahatáron belül zajtűrő is lehetne a bemutatott rendszerük, viszont, ha a külvilágból érkező jeleket szeretnénk egyfajta analóg jelből, feldolgozott digitális jellé konvertálva, a neuronokhoz hasonló viselkedésű rendszerrel detektálni, akkor figyelembe kell vennünk a zaj jelenlétét is. Kutatásom során ezt szeretttük volna megvalósítani. A feladat megoldható lenne az úgynevezett mintaillesztési módszerrel is, aminek során egy programmal a felismerendő mintát sűrűn végigpróbáljuk a mért jelen, viszont ez iszonyatosan energiaigényes feladat lenne. Egy memrisztorokból álló neuromofrikus megoldás alkalmazása az 1. fejezetben leírtakhoz hasonlóan ebben az esetben is radikálisan lecsökkentheti a detektorrendszerünk energiaigényét.

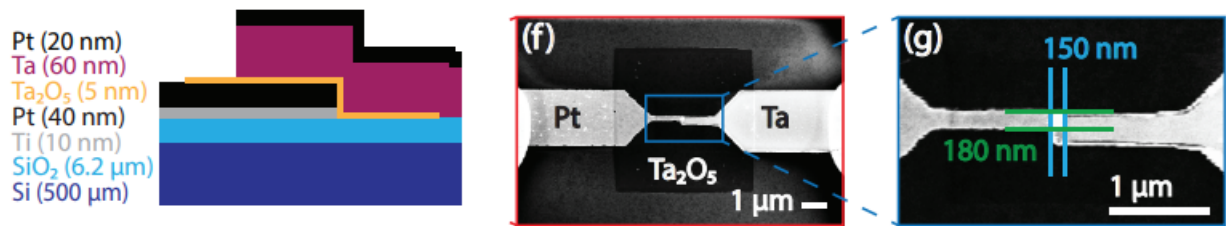
Neurális dinamikák megvalósítási módjairól olvashatunk még a [22] cikkben is. A kínai kutatók úgynevezett integrálj és tüzelj neuronmodellt valósítottak meg memrisztorokkal. A modell lényege, hogy a megfelelő paraméterű bemeneti neurális jel feldolgozását követően a neuron tüzel, vagyis magából válaszpulzust bocsát ki. A megoldásaik megfelelőek lehetnek egy külvilágból érkező jel neurális mechanikával történő detektálására, viszont a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából túl sok komponenst tartalmazhatnak, és túlságosan energiaigényesek lehetnek.

4. fejezet

A Ta_2O_5 memrisztor vizsgálata

A Ta_2O_5 alapú memrisztorok úgynevezett nem-illékony memóriacélú felhasználásával kapcsolatban több kutatás is folyik. Ennek lényege, hogy a memrisztor rákapcsolt feszültség nélkül is megőrzi az állapotát. Gyors, és megbízható kapcsolási tulajdonságainak köszönhetően egy kitűnő jelölt lehet a szilícium alapú flash-memóriák leváltására. Kapcsolási jelenségük alapja a bennük lévő oxigén-vakanciák migrációján alapul, ahogy a 2.1.1 szakaszban fentebb olvasható. Az általunk használt Ta_2O_5 alapú memrisztor összeállítás bipoláris kapcsolású, tehát az ellentétes előjelű feszültséggel kapcsolhatók az ON és OFF állapotok között.

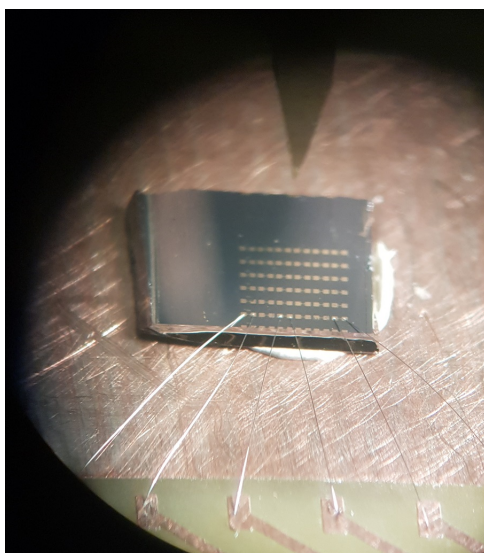
Annak érdekében, hogy szimulálni tudjunk akár több memrisztorból álló összeállításokat is, vizsgálnunk kell a későbbiekben gyakorlatban is alkalmazni kívánt memrisztorok kapcsolási paramétereit. A modell paramétereit a valós mért adatoknak megfelelően kell megadnunk. Ennek érdekében feszültség-idő karakterisztikát vizsgáló méréseket végeztem a Ta_2O_5 mintáinkon, hogy illeszthessük a memrisztorokat leíró modell paramétereit. A mintákat Csontos Miklóstól kaptuk a zürichi ETH kutatólaboratóriumából. A Miklós által használt minták elektronmikroszkópos felvételei alább találhatók. A képek főként csak demonstrációs célokat szolgálnak. Fontos megjegyezni, hogy a mi memrisztoraink nem pontosan így néztek ki, a Miklós által használt minták optimalizálva lettek az ultragyors kapcsolási jelenségek tanulmányozásához, ezért azok keresztmetszete kisebb, mint a mi mintáinké.



4.1. ábra. A Ta_2O_5 alapú memrisztorokról készült elektronmikroszkópos felvételek, és egy keresztmetszeti sematikus ábra [23]

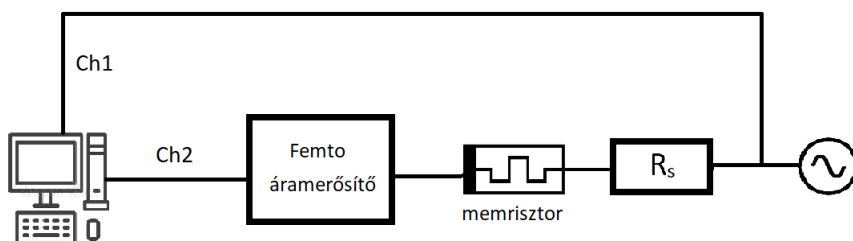
A mintakészítés során a felső Pt elektródot egy Si/SiO₂ hordozó lapkára párologtatták, egy vékony Ti tapadóréteg segítségével. Ezt követően az 5nm vastag Ta_2O_5 aktív réteget, a felső Ta elektródot, és a Pt záróréteget nagyenergiás porlasztással vitték fel. Az eszköz mintázatát standard elektronsugaras litográfiával és lift-off módszerrel végezték. [23]

A kutatásom során lehetőségem nyílt megismerni a mintapreparációs folyamatokat. A kezdetben egy hordozólapkán lévő memrisztorok tucatjait tartalmazó mintát egy nagyobb, párhuzamos porttal rendelkező mintatartó NYÁK lapjára kell ragasztani. A ragasztást ezüstpasztával végezzük. Az ezüstpaszta száradását követően nekiláthatunk a memrisztor minták mérőlapkára való kivezetéséhez. A folyamat során vékony alumínium szálal "nyomunk" a minták elektródáiba, amit kihúzunk a mintatartó megfelelő fém padjaihoz. A szálillesztést egy úgynevezett bonder segítségével végezzük, ami mikrométer pontossággal vezérelhető, finom kábelezést tesz lehetővé a nanoelektronikai kísérletkehez használt eszközöknél.



4.2. ábra. A memrisztor minta a mintatartó lapkára ragasztva és kábelezve.

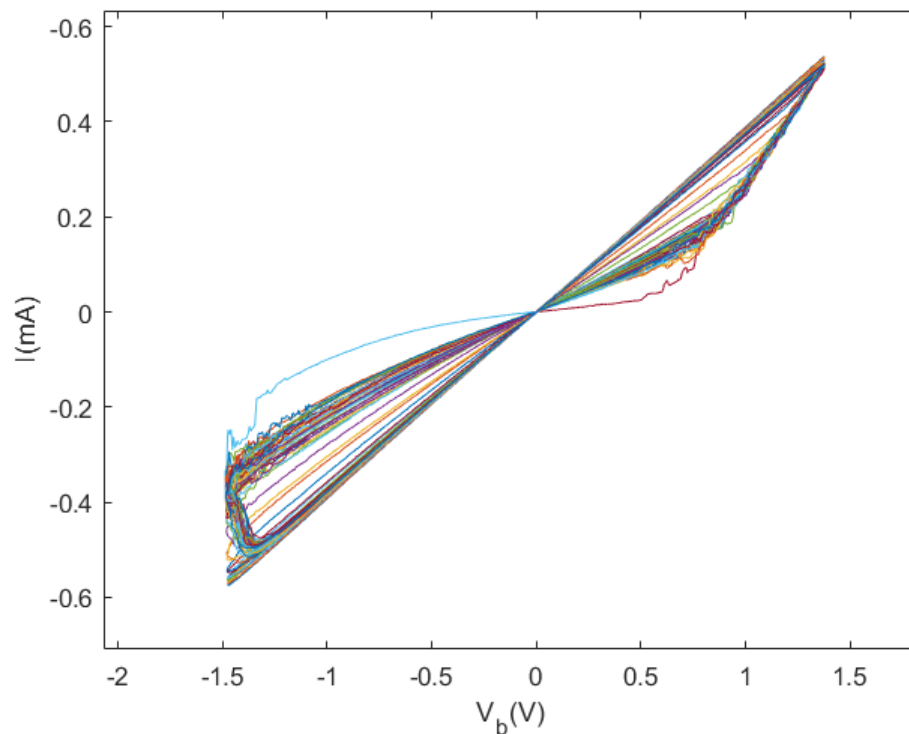
Munkám során megismerkedtem a minták mérési eljárásával, és azok kapcsolási karakterisztikájával is. A memrisztorok kapcsolásához azokra egy soros ellenálláson keresztül egy **Siglent SDG1050** függvénygenerátorral előállított szimmetrikus háromszögjeleket kapcsoltam, majd azt egy **Femto-DLPCA200** áramerősítőn keresztül egy **NI USB-6363** mérőkártya segítségével, egy belső fejlesztésű mérőprogrammal vizsgáltam.



4.3. ábra. A vizsgálataink során használt memrisztorellenállást mérő összeállítás

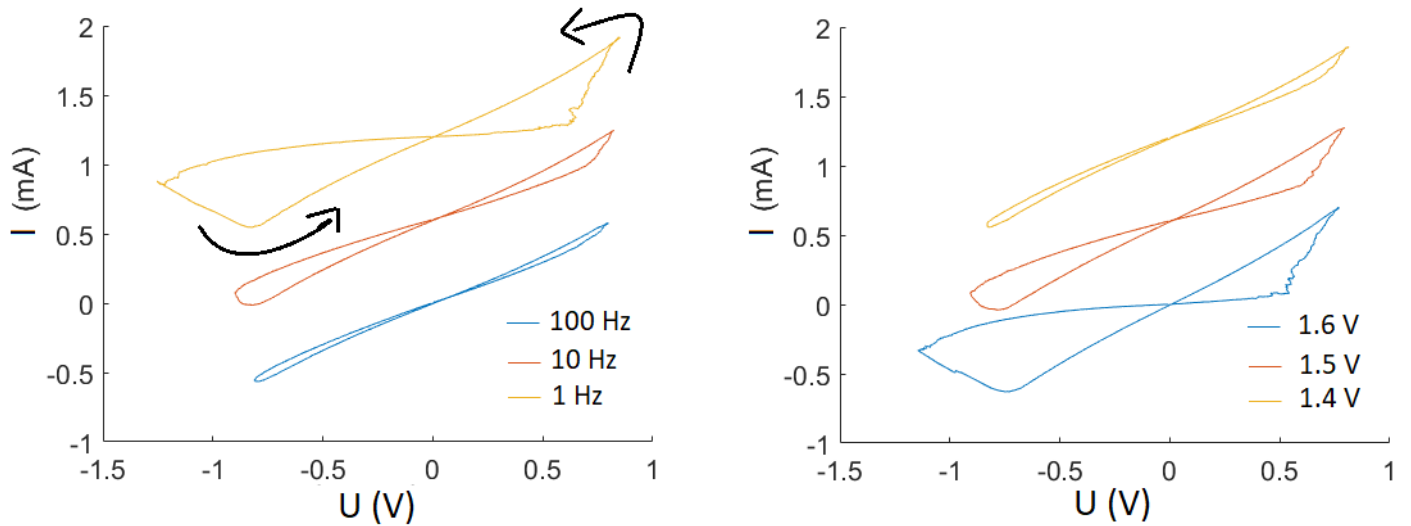
A mérőprogramot Pósa Lászlónak köszönhetjük, aki C#-ban írta a kutatócsoportunk által évek óta használt szoftvert. A (4.4.) ábrán látható a rendszerrel mért néhány próba kapcsolás. A megfelelő minták megtalálásakor fontos szerepet kapott azok kapcsolási görbéinek vizsgálata, hiszen néhány esetben előfordult, hogy valamilyen gyártási hiba folytán pár kapcsolás múlva elromlott a tesztelt memrisztor. Ennek érdekében több száz próbakapcsolással ellenőriztem az új mintacsomagok megbízhatóságát, egyfajta terhelési tesztet végrehatjva. A (4.4.) ábrán látható kapcsolások jó példák egy stabilnak számí-

tó memrisztorra, mivel többszöri kapcsolásra is viszonylag hasonlóan reagált, a legtöbb esetben stabilan kapcsolt.



4.4. ábra. Egy tesztmérés eredményei a Ta_2O_5 memrisztoron.

Ezt követően kimértem, hogy az alkalmazott minták is produkálják-e a feszültség-idő dilemmát. A kapcsolásokat elemezve a modellhez szükséges paramétereket határozhattam meg (lásd (4.5. ábra)). Ilyenek az ON- és OFF állapotú ellenállás, illetve a τ időállandó, a k , a és c paraméterek.

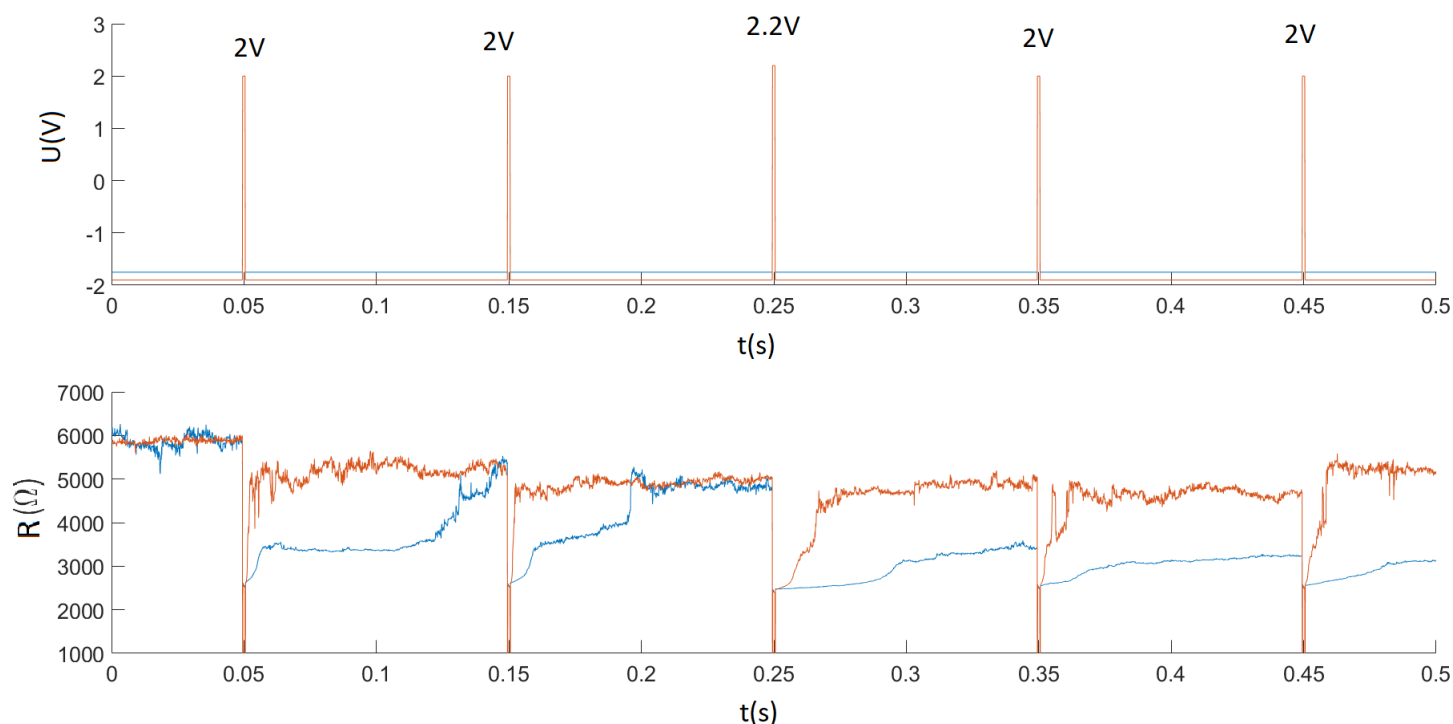


4.5. ábra. Az általunk használt Ta_2O_5 memrisztoron is megfigyelhettem a feszültség-idő dilemmát. A kapcsolás paramétereit alapján a Ta_2O_5 modellünk időállandóját határozhattuk meg. A nyilak ismét a kapcsolás irányát jelölik. A görbék a jobb láthatóság érdekében a függőleges tengely mentén el vannak tolvva egymáshoz képest.

4.1. Memória jelenségek a Ta_2O_5 memrisztorban

A memrisztorok idegsejtekhez hasonló viselkedésére számos gyakorlati demonstráció létezik [2, 3, 21]. Kezdeti célkitűzésünk volt, hogy a neurális viselkedéshez hasonló rövid- és hosszútávú memóriajelenségek megvalósíthatóságát vizsgáljuk a Ta_2O_5 memrisztorunkon. A rövidtávú memória jelenségénél a megváltozott ellenállás a vizsgált időablakon belül visszarelayál, hosszútávú memória esetében továbbra is ott marad. Mivel a Ta_2O_5 nem-illékony memória, ezért csak külső feszültség hatására kapcsol, így csak hosszútávú memóriát lehetne vele demonstrálni. Ezzel szemben, ha valamilyen külső háttérfeszültséget kapcsolunk rá, annak állapota a kapcsolás időállandójától függően megváltozik. Ezt figyelembe véve vizsgáltam, hogy hogyan reagál a Ta_2O_5 memrisztorunk egy előfeszített jelbe helyezett eltérő amplitúdójú impulzusokra.

Az (4.3). ábrán található összeállításban négyszögjeleket küldtem a memrisztorokra egy adott előfeszítés mellett, és közben mértem azok ellenállását. Ezzel kapcsolatban rövid- és hosszútávú memóriajelenségeket, figyelhettem meg a Ta_2O_5 memrisztorainkkal.

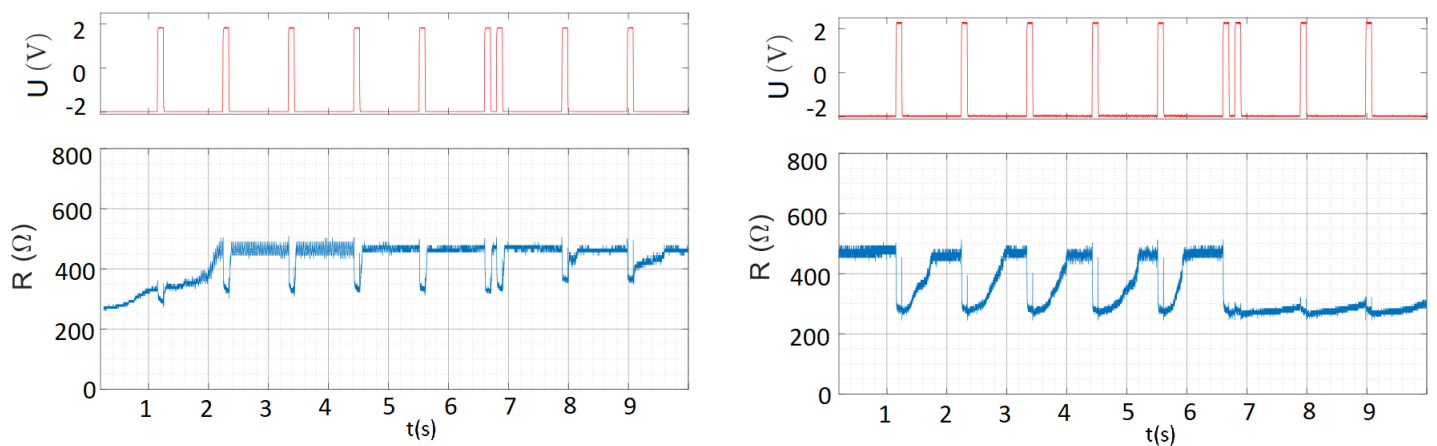


4.6. ábra. A rövid- és hosszútávú memória jelenségek demonstrálása a Ta_2O_5 memrisztorokban. A fenti grafikon a bemeneti jelet, az alsón pedig a vizsgált memrisztor ellenállásának reakcióját mutatja eltérő előfeszítések mellett mérve. A sárga görbék -1.9 V-os előfeszítés mellett, a kékek pedig -1.75 V-os előfeszítés mellett lettek mérve.

A (4.6.) ábrán lévő kék görbéken az látszik, hogy a kisebb pulzusokra (2 V) csak rövidtávon kapcsol a memrisztor, utána a negatív előfeszítés miatt visszaáll az OFF állapotába, így rövidtávú memóriát utánozva. A középső nagyobb pulzusra (2.2 V) viszont annyira kis ellenállásba kapcsol a memrisztor, hogy a negatív háttérfeszültség nagy része az R soros ellenálláson fog esni, ami miatt a memrisztort a háttérfeszültség nem tudja visszakapcsolni, így az hosszú távon is ON állapotban marad. Emiatt az utóbbi esetet a hosszútávú memóriával azonosíthatjuk. Továbbá azt is megfigyelhettük, hogy az előfeszítés nagysága is befolyásolja a memrisztor kapcsolhatóságát. A sárga görbék -1.9 V-os előfeszítés mellett, a kékek pedig -1.75 V-os előfeszítés mellett lettek mérve. A sárga görbéken látszik, hogy a túl nagy előfeszítés miatt még a nagy pulzusra sem került hosszútávú ON állapotba a memrisztor. Egy gyors lekapcsolást követően az egyből visszaállt az eredeti OFF állapotába. A visszarelaxáció ideje fontos szempont, hiszen a

Ta_2O_5 alapú memrisztorokat leíró modellben ettől függ a kapcsolás τ időállandója. A méréseinkkel sikerült bizonyítani az idegsejtek viselkedéséhez hasonló, a beérkező pulzusok nagyságától függő rövid és hosszútávú memóriaállapotot egy Ta_2O_5 memrisztorban. Az előfeszítés nagyságának variálásának hatása a membránpotenciállal mutat analógiát.

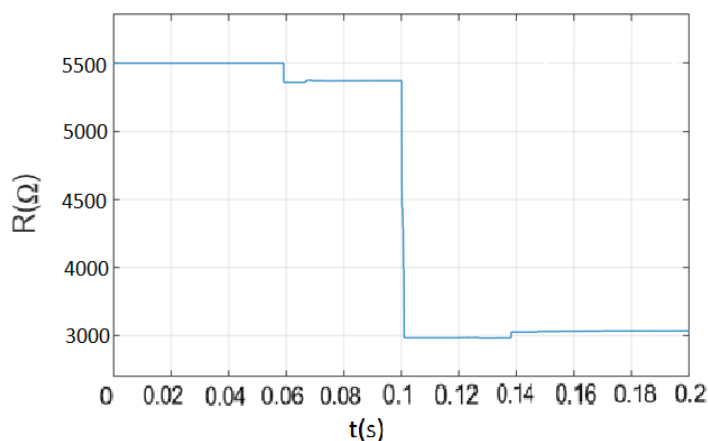
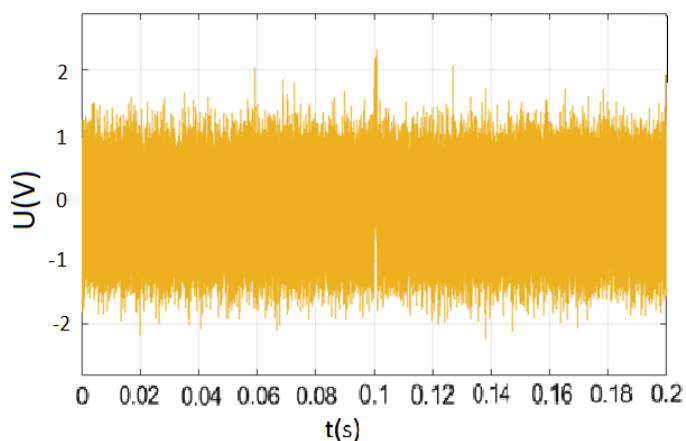
A neuronokba érző adott amplitúdójú pulzusok eltérő gyorsasággal érkehetnek. Ezt a stimulus nagyságával lehetne párhuzamba hozni. Vizsgálataink során ezt is sikerült megvalósítanunk a memóriajelenségeket tesztelő kapcsoláshoz hasonló módon. Először alacsonyabb, megegyező amplitúdójú egyszeri- és dupla pulzusokat küldtünk a memrisztorra egy -2 V-os negatív előfeszítés mellett. Ebben az esetben az egyszeri- és a dupla pulzusok sem kapcsolták hosszútávú ON állapotba a memrisztort. Ezt követően növeltük a pulzusok amplitúdóját. Megfigyeltük, hogy ekkor a dupla pulzus beérkezésekor az első pulzus annyira lekapcsolta a memrisztort, hogy onnan nem volt ideje visszakapcsolni az eredeti OFF állapotába, mielőtt beérkezett volna a második pulzus. Ezután a második pulzus még jobban lekapcsolta, viszont ekkor már nem esett elég feszültség a memrisztoron, hogy később amiatt visszakapcsoljon, így hosszútávon is ON állapotban maradt. Ezzel az eredménnyel még egy analógiát vonhattunk a nem-illékony memóriájú Ta_2O_5 memrisztor és a biológiai idegsejtek között a tüzelési gyakoriságot illetően, a bemeneti pulzusok amplitúdójának hangolásának segítségével.



4.7. ábra. A memrisztorba érkező pulzusok amplitúdó- és gyakoriságfüggését vizsgáló mérés eredményei. A baloldali grafikonon a 4 V amplitúdójú pulzusokkal mért ellenállásesés csak rövidtávon maradt meg. A jobboldali grafikonon a 4.1 V-os bemeneti pulzusok esetén a dupla pulzus sikeresen hosszútávú ON állapotba kapcsolta a memrisztort.

Ismerve a Ta_2O_5 memrisztorok memóriatulajdonságait, és azok reakcióját a pulzus nagyságra megpróbáltunk zajos feszültségjelben pulzusokat detektálni vele. A memóriatulajdonságokból következtetve azt feltételeztük, hogy a memrisztor feltehetőleg csak a nagyobb pulzusra és nem a zajra fog kapcsolni. A fenti példában a zajt megfeleltethetjük a kisebb, illetve ritkább pulzusoknak, a detektálandó jelet pedig a nagyobb, illetve frekvenciáltabb pulzusnak.

A kívülvilágban előforduló pulzusos jeleket sok esetben Gauss-görbéhez hasonlító jelekként írhatjuk le. Ilyen például a lámpák fénye, a hirtelen hanghatások dobbanásai, vagy akár az agyban lévő akciós potenciálok által keltett feszültségjelek. A dekotoráramkörünk egyik célja, hogy valamilyen kívülvilágból beérkező jelből megtalálja a Gauss-os pulzusokat, és azokat egy alkalmazott rendszer számára felismerhető módon jelezze. Ennek érdekében az eddigi eredményekből kiindulva szimuláltam, hogy zajos háttérben lévő Gauss-görbe alakú feszültségimpulzus hatására is kapcsol-e a memrisztor. A szimulációban az áramkör bemeneti jelalakját fizikai jelgenerátorokkal állítottuk elő. Ezekhez egy **Siglent SDG1050** függvénygenerátorral és egy **Tektronix AM502** differenciális erősítő segítségével generáltunk zajt, amit később egy **Rigol DG5252** jelgenerátorral előállított Gauss-os pulzussal adtunk össze egy **Lecroy DA1850** differenciális erősítővel. A kapott jelalakot egy **Picoscope Series 6000** oszcilloszkóppal mértük le, majd ezt alakítottuk át a Simulink számára olvasható formátumúvá.



4.8. ábra. A zajos háttérben lévő feszültségimpulzus hatására is ellenállásesés következett be a szimulált Ta_2O_5 memrisztoron

A feszültség-idő dilemmának köszönhetően a Ta_2O_5 memrisztor tehát egy előfeszített jelben elrejtett feszültségpulzusok hatására alacsonyabb ellenállású állapotba kapcsol, míg a zajra nem változik, így az azon keresztül folyó áramerősség megnő. A megnőtt áramerősséget felfoghatjuk a memrisztor válaszában egy zajos jelben elrejtett pulzus detektálásának hatására. Különös figyelmet kellett fordítani a megfelelő előfeszítés nagyságára, hiszen előfordult, hogy a zajban lévő kisebb-nagyobb átlagon felüli nagyságú tüskék is kapcsolták a memrisztort.

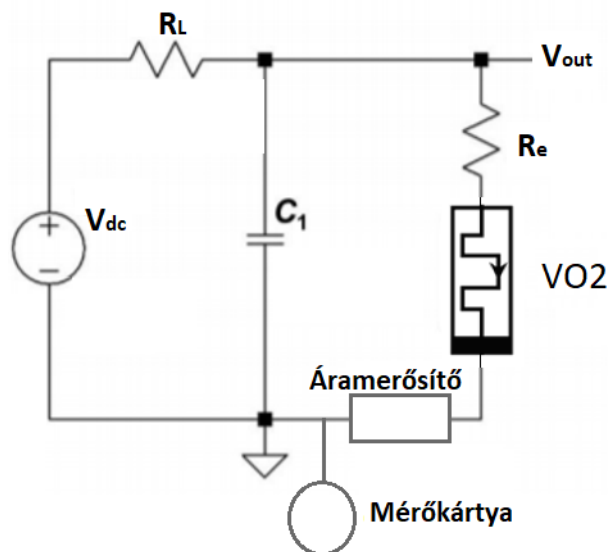
5. fejezet

A VO_2 memrisztor vizsgálata

A VO_2 memrisztorok Mott-átmenettel, szigetelő-fém átalakulással működő reiszatív kapcsoló memóriák. A jelenségről bővebben a 2.1.2. szakaszban olvashatunk. Lényege, hogy annak kis- és nagy ellenállású állapotának magyarázata az anyag szigetelő-fém fáziváltozásának következménye. Az általunk használt $\text{Au}/\text{VO}_2/\text{Au}$ felépítésű, két Au elektróda közé helyezett fém-oxid memrisztorok illékony memóriával rendelkeznek, ezért rájuk kapcsolt feszültség hiányában visszaállnak eredeti állapotukra.

5.1. A VO_2 memrisztor oszcillációja

A VO_2 memrisztoraink illékony memória tulajdonságát felhasználhatjuk, hogy oszcillátor áramkört építsünk velük. A memrisztort tartalmazó oszcillátor áramkör működése a (5.1.) ábrán található.

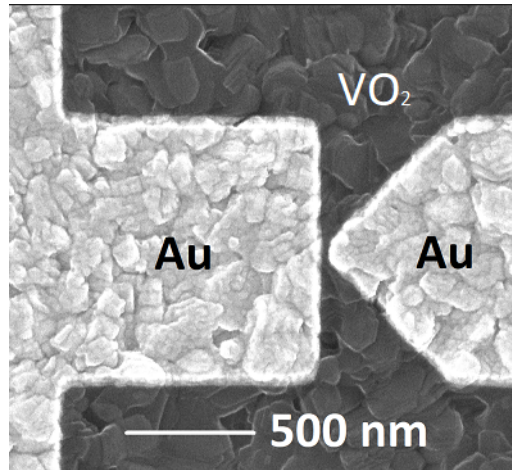


5.1. ábra. A VO₂ memrisztor oszcillátor áramköre

A kezdetben nagy ellenállású memrisztorra egyenfeszültséget kapcsolunk, a memrisztoron átfolyó áramot áramerősítőn keresztül egy **NI-USB6363** mérőkártyán keresztül mérjük. Az egyenfeszültség hatására a memrisztor átkapcsol alacsony ellenállásúvá (a feszültség előjele itt nem fog számítani, hiszen unipoláris kapcsolású memrisztorról van szó). Alacsony ellenállása révén most a soros ellenálláson fog több feszültség esni. Viszont ha a memrisztoron egy bizonyos küszöb alatti nagyságú feszültség esik csak, az illékony memóriaként visszaáll eredeti magas ellenállású állapotába, így ismét nagy feszültség esik majd rajta, ami megint átkapcsolja. A folyamatba ha bele vesszük a kondenzátort akkor pontosan beállíthatjuk az oszcilláció frekvenciáját. Utóbbi nem volt célunk, csupán az oszcillációs dinamikát vizsgáltuk, inkább a megfelelő kapcsolási szintek meghatározására koncentráltunk a később leírtak szerint.

5.2. A VO₂ stabilitás vizsgálata

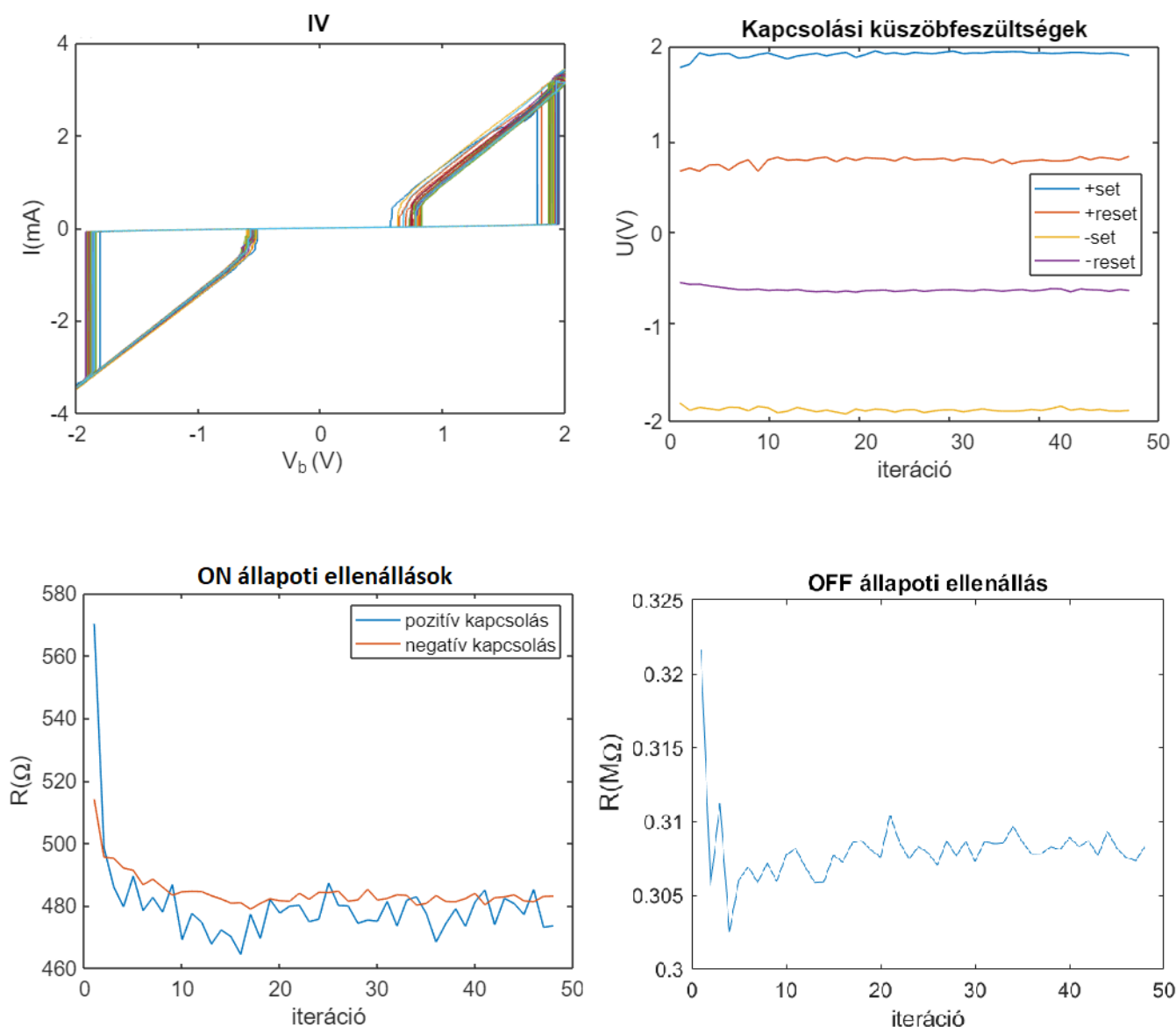
A kísérleteinkben használt VO₂ memrisztorokat Török Tímea témavezetőm és Pósa László készítették az EK MFA Nanoérzékelők Laboratóriumában.



5.2. ábra. A VO_2 memrisztorról készült pásztázó elektronmikroszkópos felvétel

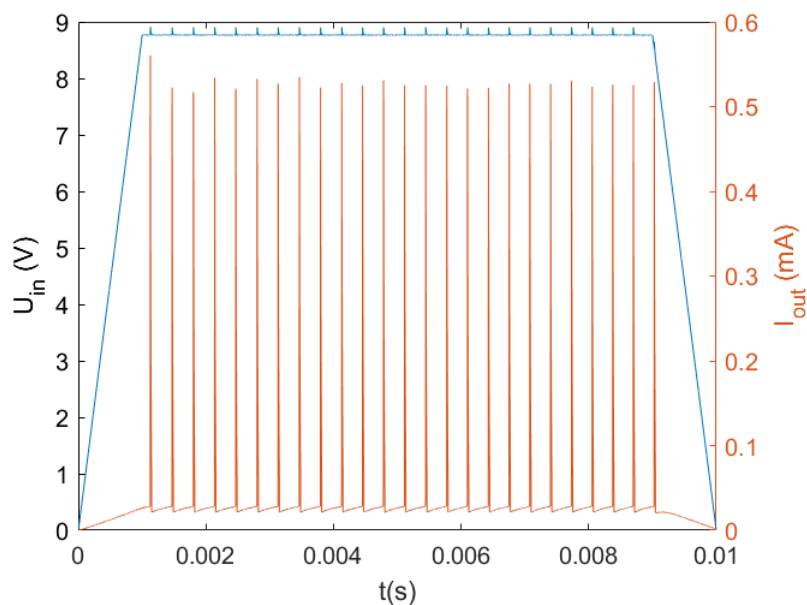
Az $\text{Au}/\text{VO}_2/\text{Au}$ összetételű memrisztorok szilícium-oxid hordozóra porlasztott vanádium réteg termikus oxidációjával készültek. A VO_2 rétegen ezt követően elektronsugár-litográfiával laterális nanokontaktusok rajzolata került kialakításra, majd 5 nm titán tapadóréteg közbeiktatásával 60 nm arany lett párologtatva a rajzolatokba. Végül pedig standard lift-off eljárással készültek el a VO_2 réteg felületén található $\text{Au}/\text{VO}_2/\text{Au}$ nano-kontaktusok [24].

A minták gyártási folyamata a tökéletlen berendezések miatt sok esetben nem működő mintákat produkált. Ebből kifolyólag fontos volt, hogy bármiféle áramkörbe helyezés előtt a megfelelő memrisztort válasszuk ki a kb. 70 darabot tartalmazó mintából. Ennek érdekében több tucat kapcsolással igyekeztem klasszifikálni a nagyobb tűrőképességgel rendelkező mintákat. Egy ilyen klasszifikálás eredményei láthatók a (5.3.) ábrán. A modellmemrisztor paramétereire a VO_2 memrisztort a (4.3.) ábrán lévő áramköri összeállításban mérve olvastam ki annak kapcsolási küszöbfeszültségeit, illetve ON és OFF állapoti ellenállásait.



5.3. ábra. Egy megfelelően működő VO₂ minta IV görbéi, illesztésből nyert ON és OFF állapotú ellenállásai és a kapcsolási küszöbfeszültségei.

A kapcsolási küszöbfeszültségek, illetve az ON és OFF állapotú ellenállások a mérések alapján stabilak voltak, nem változtak sokat többszöri kapcsolgatásra sem. Így ezután ezzel a mintával folytattam a kísérleteket. A (5.1.) ábrán található kapcsolásba helyezve a vizsgált VO₂ memrisztort, arra egyenfeszültség helyett négyszögjel alakú U_{in} feszültséget kapcsoltam, és vizsgáltam, hogy pontosan mikor kezd oszcillációba az összeállítás.



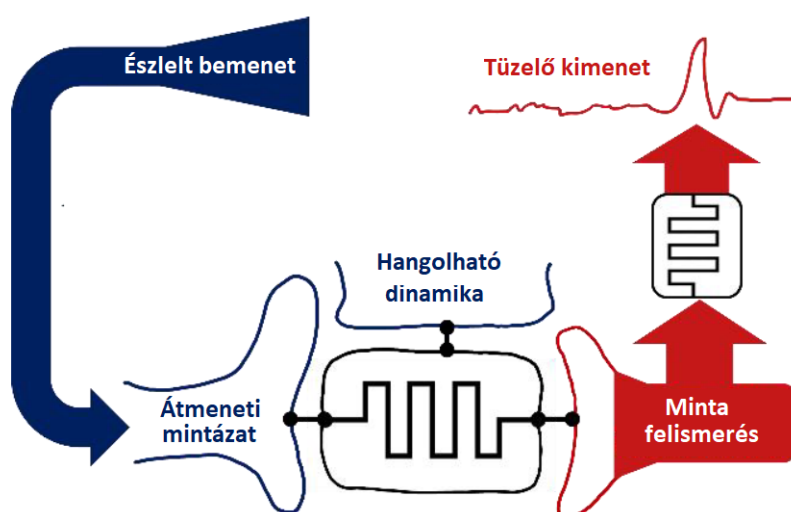
5.4. ábra. A megnövekedett U_{in} bemeneti feszültségre a memrisztoron átfolyó I_{out} áramerősség oszcillációba kezdett.

A fenti ábrán látható, hogy az oszcilláció csak egy bizonyos küszöbérték felett kezdődik el. Emelett megfigyelhetők még tüskék is a visszamért meghajtó jel tetején, aminek magyarázata, hogy az oszcilláció annyira rángatja az áramkört, hogy a kimenetre kötött mérőkártya csatornái között áthallás történik.

6. fejezet

A memrisztorok összekapcsolása

Kutatásunk során a 3. fejezetben olvasható neurális viselkedéshez hasonló dinamikával rendelkező detektoráramkört szerettünk volna megvalósítani. Tehát egy külvilágból érkező zajos háttérbe rejtett feszültségpulzust akartunk detektálni, amit a neuronokhoz hasonló módon valahogy feldolgozunk, majd azt egyértelműen jelezzük. Az áramkör sémája a (6.1.) ábrán látható.



6.1. ábra. A célunk egy neurális dinamikával rendelkező detektoregység megépítése volt, amihez lehetőleg minél kevesebb komponenst, és energiát használjunk a későbbi integrálhatóság érdekében.

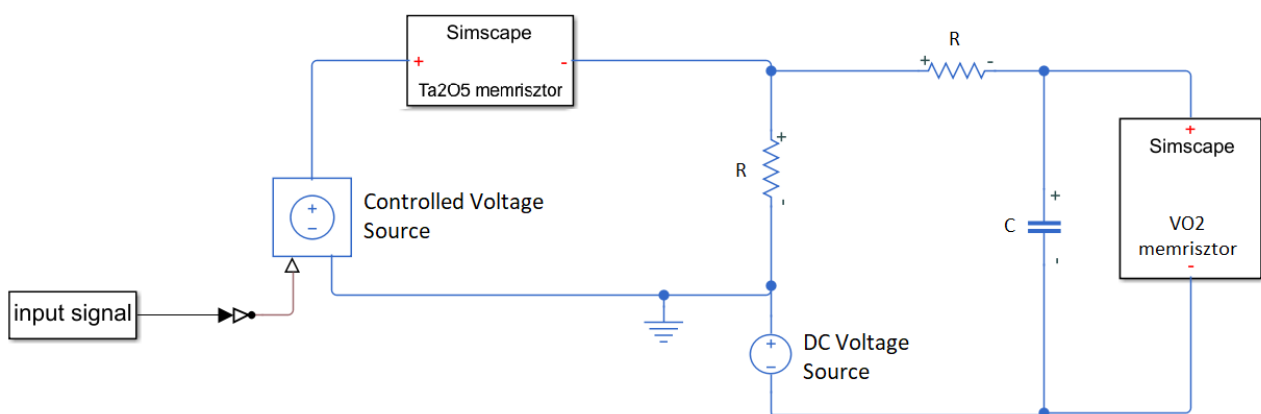
Az áramkör működése a következő: a memrisztor alapú detektoráramkör feldolgozza a bemeneti jelet, viszont a feldolgozás során történt választ, a Ta_2O_5 ellenállásának vál-

tozását zajos környezetben nem olyan egyszerű kimérni a gyakorlatban, így azt a VO_2 oszcillátor áramkörre továbbítjuk, ami egyértelmű oszcillációkkal jelzi a rendszer változását.

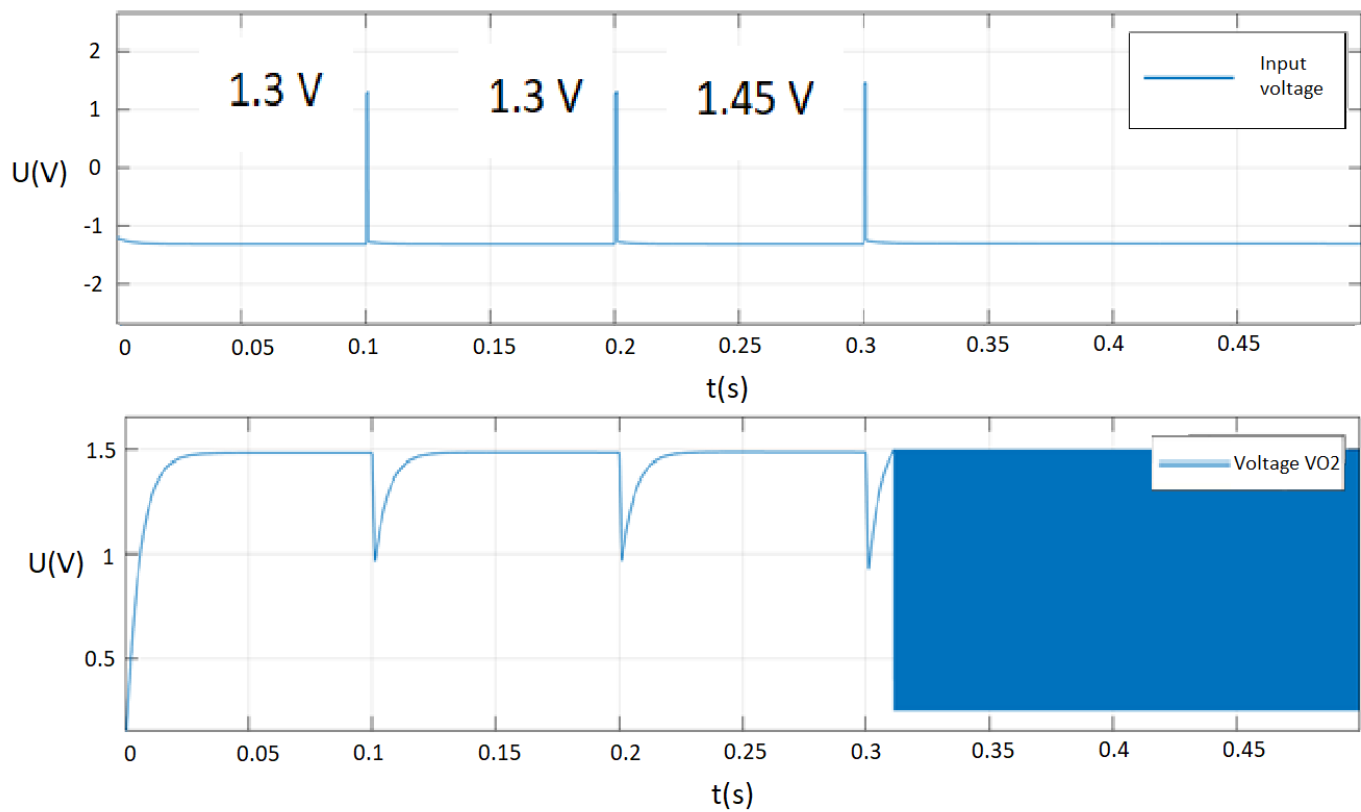
A Ta_2O_5 memrisztorral tapasztalt memóriajelenségeket felhasználhatjuk arra, hogy az egy feszültségimpulzus hatására alacsony ellenállású állapotba kapcsoljon, ezzel növelve a vele sorba kötött ellenálláson eső feszültséget, amivel előidézhetjük a VO_2 memrisztorral épített áramkör oszcillációját. Fontos, hogy megfelelő nagyságú feszültségugrást kell okoznunk a VO_2 -n, hogy azt kapcsolgathassuk (lásd (5.4.) ábra). Emiatt mindenképpen érdemes elemezni a jelenség küszöbtulajdonságait.

Miután meghatároztam a két memrisztor paramétereit, szimulálhattam azok együttes viselkedését. A szimuláció célja, hogy a VO_2 -hoz hasonló módon különböző kapcsolási paraméterek mellett vizsgáljam az áramkör viselkedését. A megfelelő áramköri beállítások és az alkalmazott áramköri elemek megtalálását segítette, hogy a szimulációban egyszerűen próbálkozhattam különböző lehetséges elrendezésekkel. Kezdetben több aktív áramköri elemet tartalmazott a detektor összeállítás, viszont később sikerült redukálni azokat csupán a VO_2 oszcillátorához használt DC tápfeszültségre, és az oszcillátor körre kapcsolt feszültségkövető feszültségforrásra.

A további vizsgálathoz, immár az ismert küszöbparaméterek ismeretében különböző amplitúdójú bemeneti feszültségpulzusokkal próbálkoztam előidezni egy (6.2.) ábrán látható áramkör kimenetének oszcillációját a Matlab Simulink programcsomagjában, hogy később meghatározhassam a megfelelő Ta_2O_5 memrisztor jeldetektálásához köthető áramköri elemek paramétereit. A szimulációkhoz a Ta_2O_5 memrisztor modell paramétereit az előzetes feszültség-idő dilemmák méréséből kaptuk, a VO_2 memrisztor modell kapcsolási küszöbfeszültségeit, illetve az ON- és OFF állapotú ellenállásait pedig a mérések alapján határoztuk meg.

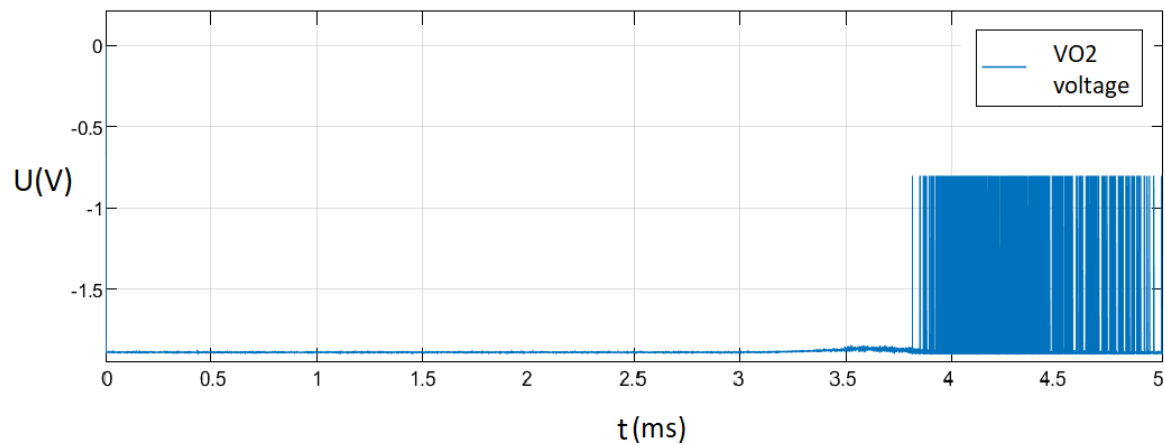
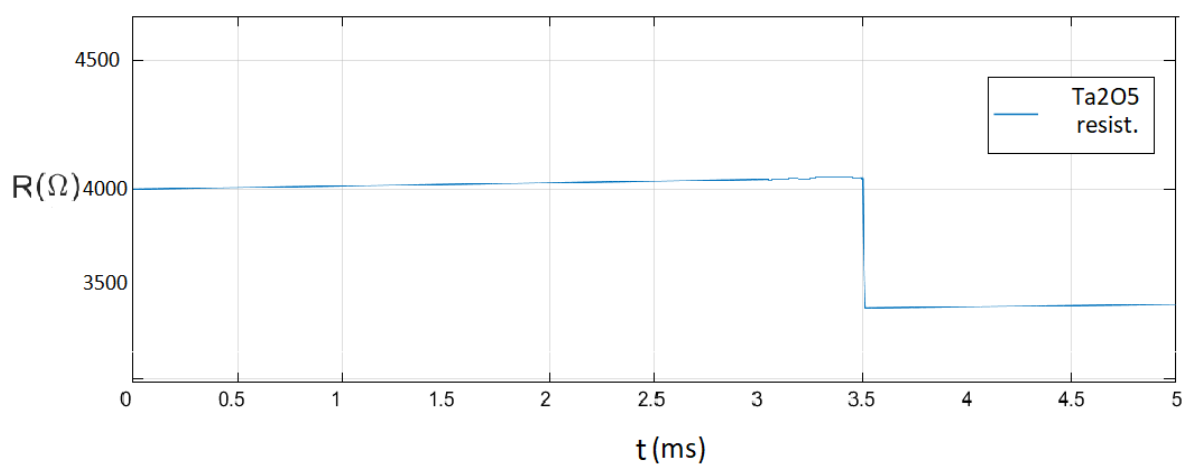
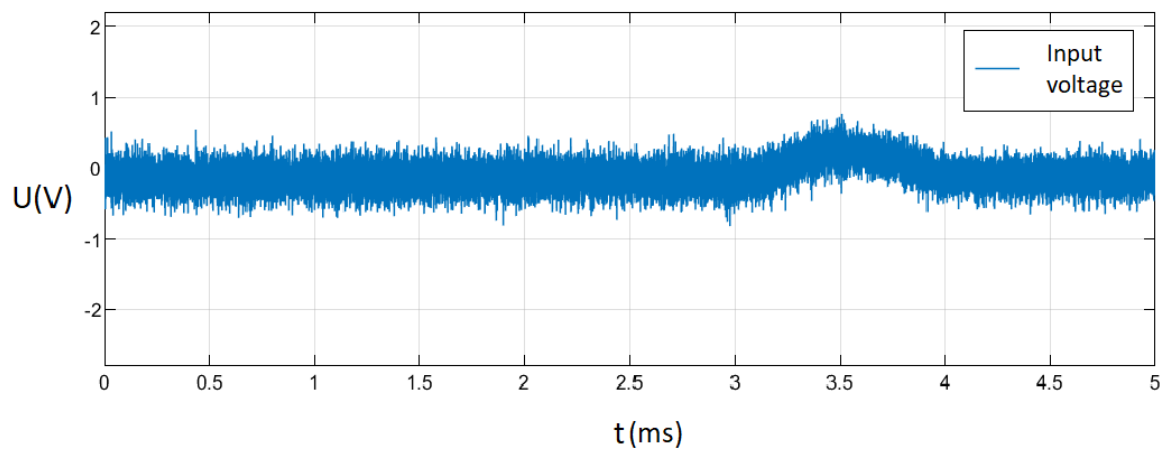


6.2. ábra. A Simulinkben összerakott detektoráramkör kapcsolási rajza.



6.3. ábra. Az összekapcsolt memrisztoregységek áramköri szimulációjának eredménye eltérő nagyságú bemeneti impulzusokkal. A felső grafikonon a bemeneti pulzusok, az alsón pedig a VO₂ memrisztoron eső feszültség oszcillációja látható.

A Ta_2O_5 detektálta az eltérő amplitúdójú pulzusokat, majd a VO_2 oszcillátor áramkör a fenti ábrán is látható módon egyértelműen jelezte a deketálást. Miután tisztább képet kaptam a detektoráramkör paramétereiről, bemenetként a (4.8.) ábrán is látható zajos jelbe helyezett Gauss-görbe alakú feszültségimpulzust küldtem a rendszerre.



6.4. ábra. A szimulált detektoráramkörön kapott mérések eredményei. Fentről lefelé a bemeneti jel, a Ta₂O₅ ellenállásesése, végül a VO₂ memrisztor feszültség oszcillációja látható.

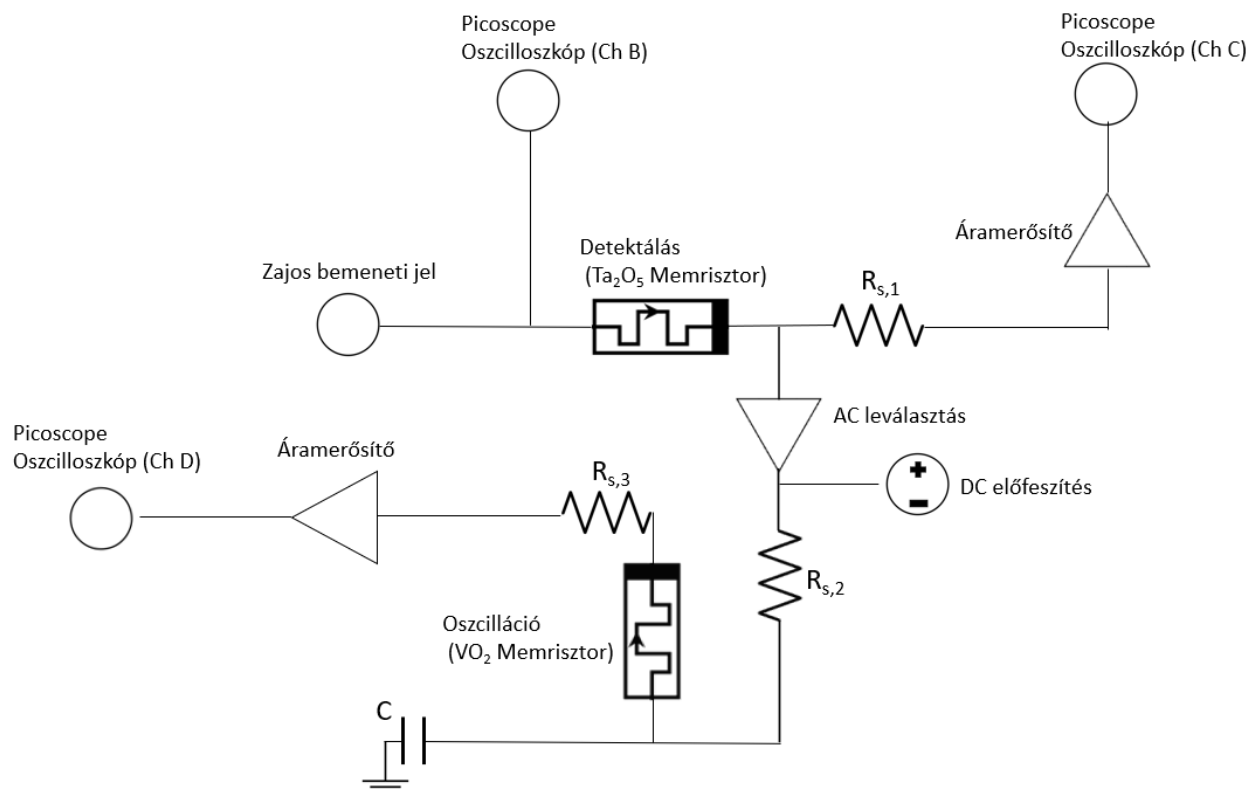
A fentiek alapján sikeresen detektáltunk egy zajos háttérben lévő Gauss-os feszültségpulzust. Érdeemes megjegyezni, hogy a fenti grafikonok nagyított időskálán vannak a jobb láthatóság kedvéért, viszont a jelalak ebben az esetben is a (4.8.) ábrán látható jelalak. A szimulációk alapján közelítőleg megkaphattuk a szükséges áramköri elemek paramétereit. Így határoztuk meg a soros ellenállások nagyságát, az oszcillátor kapcsolás tápfeszültségét, és a kondenzátor kapacitását is ez alapján választottuk.

7. fejezet

A detektoráramkör megvalósítása

A szimulációk elemzése után Molnár Dániel témavezetőm összeállított egy hasonló felépítésű áramkört, hogy a gyakorlatban is tesztelhessük a két memrisztor összeállításából következő neurális dinamikát produkáló jel detektálást. A mérések kivitelezéséhez elvégeztem az előzőleg bemutatott mintaklasszifikációs eljárásokat, majd a megfelelő mintákat az áramkörbe téve teszteltük azokat.

7.1. A mérési eljárás

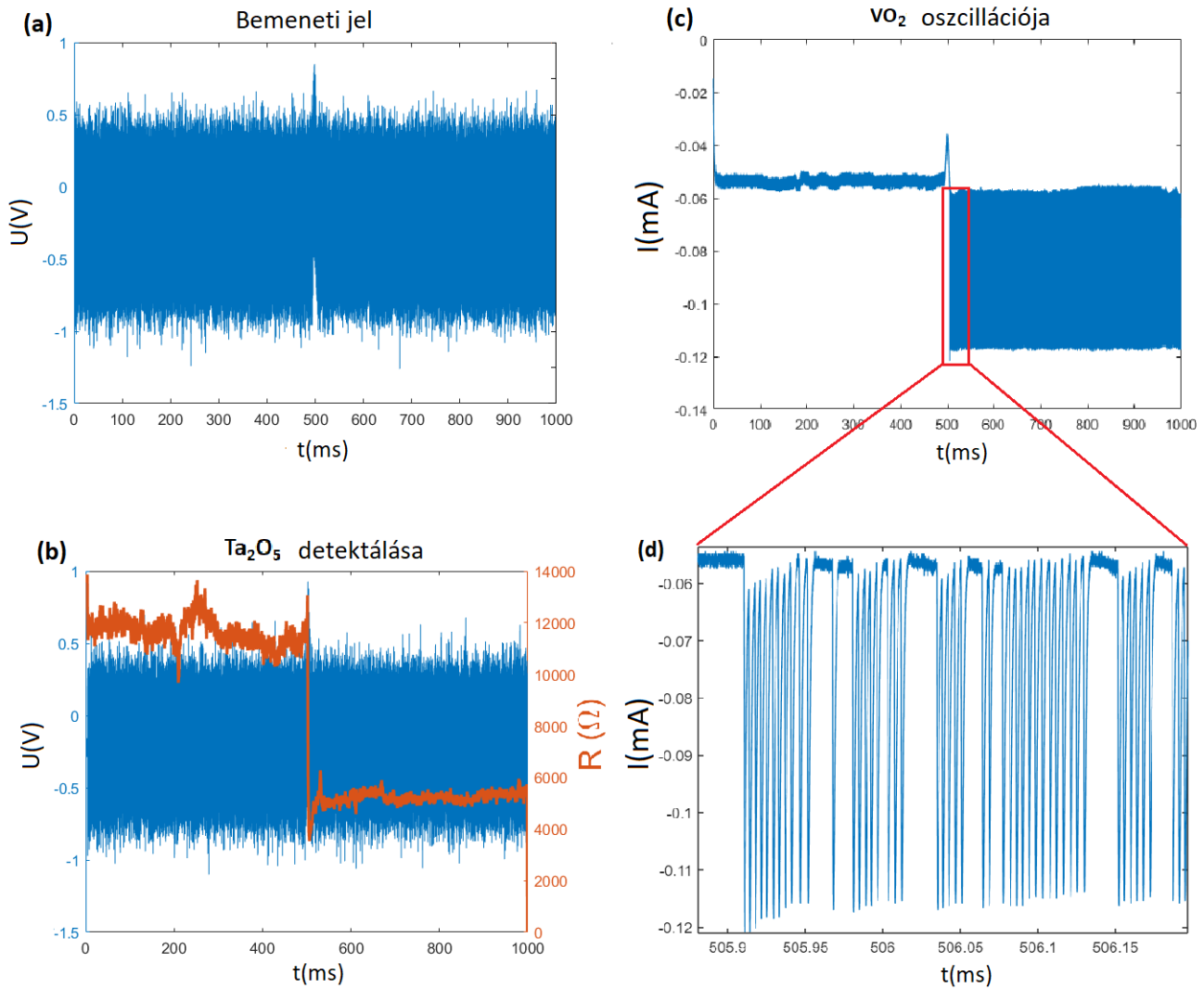


7.1. ábra. A megvalósított detektoráramkör kapcsolási rajza

A több eszközzel generált bemeneti zajos jelet a Ta_2O_5 memrisztorra kapcsoltuk, ami arra ellenálláseséssel, ebből következőleg az azon átfolyó áramerősség növekedésével reagált. Tapasztalataink alapján a vizsgált memriszorok, illetve a mérőrendszer túl zajosak voltak, így az oszcillációt akkor is előidézte amikor nem volt detektálás. Ennek kiküszöbölésére a Ta_2O_5 utáni jelen egy AC leválasztást végeztünk egy **Basel-SP908** 10-szeres differenciális erősítővel. De mivel a VO_2 csak megfelelő küszöbfeszültség felett kezd el oszcillálni és a Ta_2O_5 ellenálláscsökkenése miatt az $R_{s,1}$ ellenálláson bekövetkező feszültségnövekedés nem minden esetben elég ehhez, ezért egy DC előfeszítést kapcsoltunk még a VO_2 -ra, hogy az oszcillációs küszöbhöz állíthassuk a ráeső feszültséget. Ezekkel a lépésekkel, a (6.4.) ábrán látható szimulációs pulzusdetektáláshoz hasonló megbízhatósággal tudtuk előidézni az oszcillációt. Érdeemes megjegyezni, hogy a kutatásunkban csupán a jelenség megvalósíthatóságát vizsgáltuk, és a memriszor paraméterek megfelelő hangozásával mindezt AC leválasztás és plusz előfeszítés nélkül is meg lehetne csinálni, ahogy

(6.2.) ábrán látható kapcsolás szimulációs eredményei is mutatják. A Ta_2O_5 ellenállását a bemeneti jel utáni feszültségmérésből, és az $R_{s,1}$ soros ellenállás áramának méréséből számoltuk. Utóbbit egy áramerősítőn keresztül egy **Picoscope Series 6000** oszcilloszkóppal mértük le. A VO_2 -on átfolyó áramot az $R_{s,3}$ soros ellenállás áramának mérésével tettük hasonló módon az oszcilloszkóp egy másik bemenetén.

A mérés komplexitásából kifolyólag a rendszert először komponensenként próbáltuk ki. Kezdsnek a Ta_2O_5 detektálását ellenőriztük, emellett a VO_2 oszcillációját indítottuk be egy adott feszültségeséssel. A Ta_2O_5 memrisztor bemeneti jeleként a (4.8.) ábrán látható zajos jelbe rejtett feszültségimpulzust használtuk. A klasszifikációs mérések ellenére így is előfordult, hogy esetleges gyártási hibák miatt újra kellett kalibrálni a bemeneti jelet, hogy megfelelő előfeszítésű legyen, és kapcsoljon rá a Ta_2O_5 . Hasonló helyzet történt a VO_2 memrisztorokkal is, ugyanis egy idő után, ha hosszabb ideig nem mértünk az adott mintákon, akkor azok küszöbfeszültségei hajlamosak voltak "elmászni", így az oszcillátor részben újra kellett kalibrálni az előfeszítést. A jelenség oka talán a minták külső oxidrétegének sérülése volt, ami miatt a diffúzió következtében a gyártási paraméterektől eltérő összetételűvé válhattak. A mérések teszteredményei a (7.2.) ábrán láthatók.



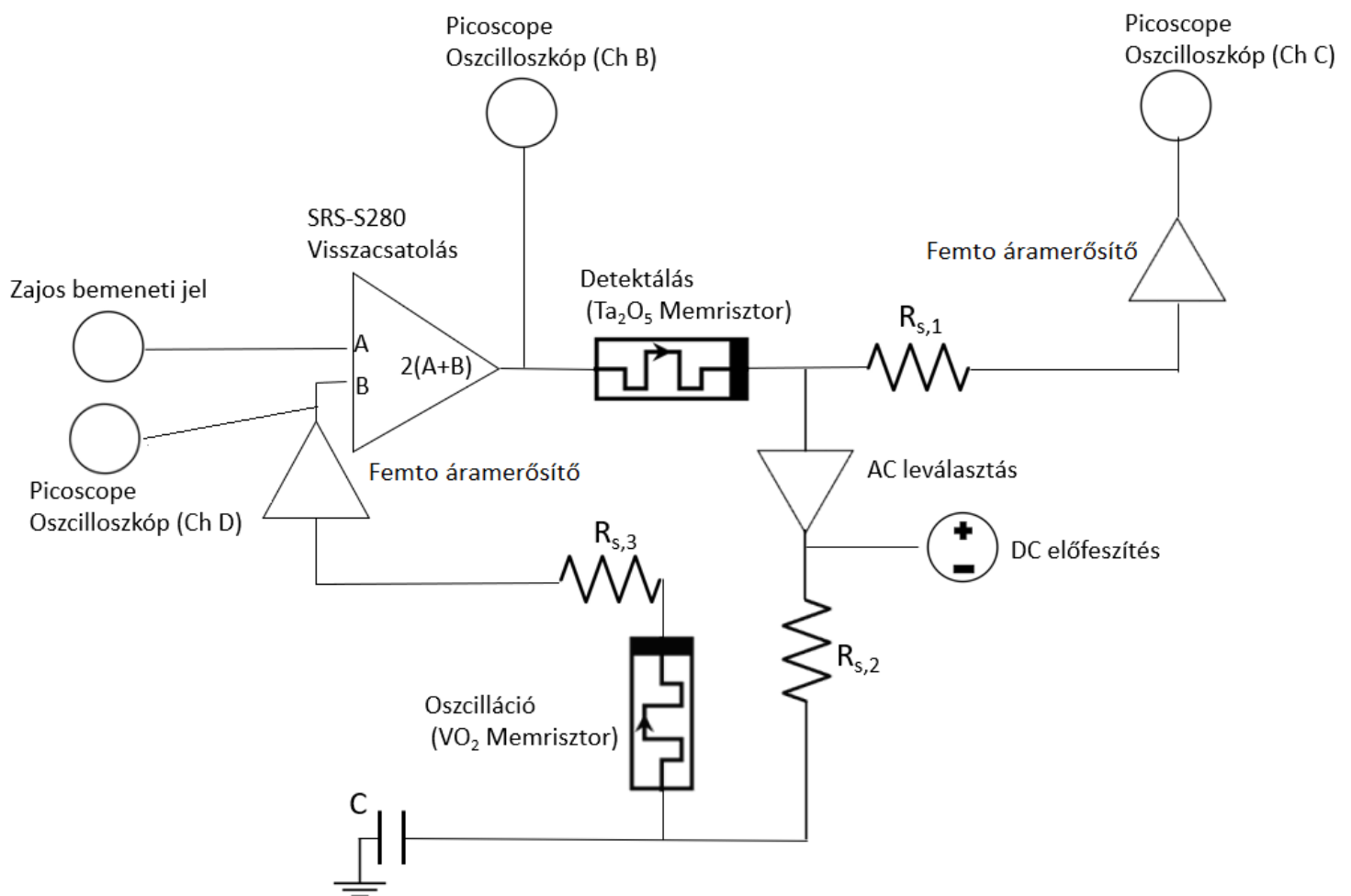
7.2. ábra. A zajos háttérbe rejtett Gauss-os feszültségpulzust (a), a Ta_2O_5 memrisztor sikeresen detektálta, amit ellenállásváltozással jelezett (b), amire a VO_2 oszcillációval reagált, amit az azon átfolyó áram mérésével mutattunk ki (c). A (d) jelű ábrán a kinagyított oszcillációt ábrázoltam. Az oszcilláció nem volt teljesen egyenletes. Ez lehet akár annak a következménye, hogy a Ta_2O_5 ellenállásváltozása okozta feszültségváltozás nagysága éppen a VO_2 oszcillációs küszöbfeszültsége körül mozgott.

Az újrakalibrációs lépések, illetve a zajleválasztási probléma ellenére a méréseink sikeres jeldetektálás kiváltotta oszcillációs viselkedést mutattak. Érdeemes megjegyezni, hogy elméletileg lehetséges lenne egy csupán passzív áramköri elemekből álló detektor kapcsolás megépítése, viszont az ehhez szükséges megfelelő memrisztor paraméterek finomhangolására jelenleg még nincs lehetőség a gyártási eljárások alulfejlettsége miatt. További munkám során ennek megvalósíthatósági lehetőségeit is tervezem vizsgálni. Reméljük,

hogy az elkövetkező 5-10 évben a technológiai fejlődés számos új, pontosabb memrisztor alapú megoldásokat tesz majd lehetővé számunkra.

7.2. Az áramkör továbbgondolása

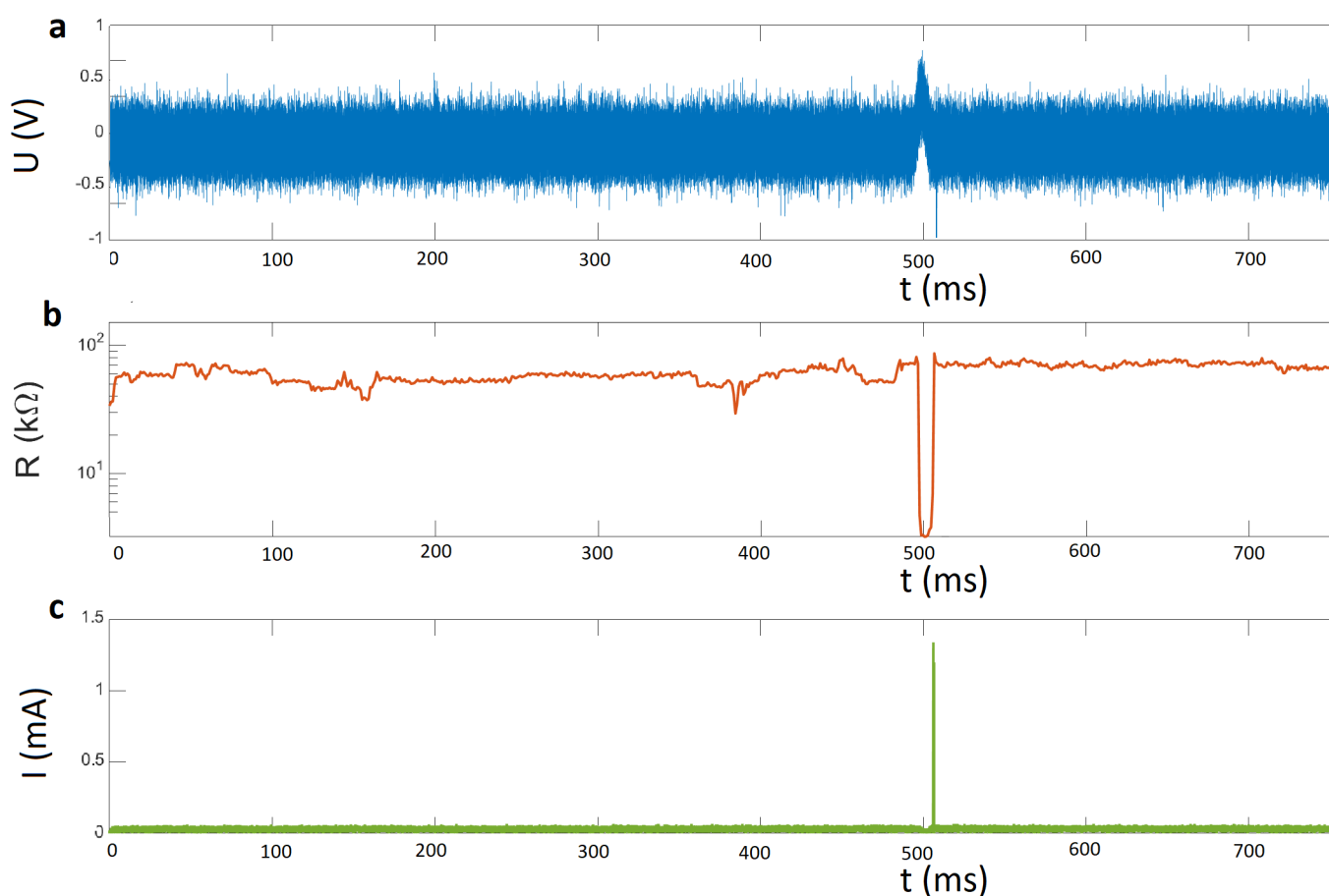
A sikeres kísérletek után Molnár Dániel témavezetőm átalakította a detektor áramkört, hogy az neurális tüske jellegű választ adjon jelzésként. A kapcsolás a (7.3.) ábrán látható.



7.3. ábra. A visszacsatolással rendelkező detektoráramkör kapcsolási ábrája

Szerettük volna elérni, hogy a biológiai neuronokhoz hasonló neurális pulzussal reagáljon a rendszer a detektált jelre. Ehhez az oszcillációt használtuk fel, amit az első néhány periódus után leállítottunk, ami így egy pulzusszerű kimenetként mutatkozott.

Az oszcilláció megállításához vissza kellett billenteni a Ta_2O_5 memrisztort OFF állapotba. Ehhez praktikusán a VO_2 -on átfolyó áram megváltozását használtuk fel, amit egy **Femto-DLPCA200** áramerősítővel visszavezettünk, egy **SRS-SR280** kapuzott integrátorral összeadtuk az előfeszítéssel, majd az eredményt kétszeresen kierősítettünk. Az áram visszacsatolása azért volt praktikus, mivel a VO_2 memrisztoron oszcilláció hiányában annak nagy ellenállású alapállapota miatt szinte nem folyik áram, így ilyenkor a visszacsatolt jelben az elhanyagolható járulékot ad. Oszcillációkor viszont az áram egy áramerősítőn visszavezetve pont annyival csökkenti a Ta_2O_5 -on eső feszültséget, hogy az visszakapcsoljon OFF állapotba. Az erősítésre pedig azért volt szükség, mert a VO_2 -on, átfolyó áram változása mA nagyságrendű volt. A nagy ellenállásba visszabillentett Ta_2O_5 memrisztor miatt újból az oszcillációt előidéző küszöb alatti feszültség fog esni a VO_2 -on, így az abbahagyja az oszcillációt. A paraméterek beállításához felhasználtuk az (5.4.) ábrán látható, VO_2 oszcillációs küszöbfeszültségét vizsgáló mérés eredményeit. A mérések grafikonon ábrázolt eredményei a (7.4.) ábrán találhatók.



7.4. ábra. A visszacsatolt áramkörben mért bemeneti jel (a), a Ta_2O_5 ellenállása (b), és a VO_2 -on átfolyó áram (c).

A bemeneti zajos jelben lévő feszültségpulzust a Ta_2O_5 sikeresen detektálta, tehát alacsony ellenállásba kapcsolta. Ennek hatására a VO_2 oszcillációba kezdett, ami az abból kijövő áramon is meglátszott a fenti ábra alsó grafikonján is. Ezt az áramváltozást a Ta_2O_5 -ba visszavezetve azt visszakapcsolta újra nagy ellenállásúvá. A végeredmény a jel detektálását követő integrációs folyamat következtében generált áramimpulzus kiadása. A kiadott jelet értelmezhetjük egy bemeneti pulzus kiváltotta akciós potenciálként, ami az idegsejtek legalapvetőbb ingerületvezetési módszeréhez hasonlít.

Az áramkör az összeállítását követően egy 93 és egy 97 egymást követő kapcsolásból álló tesztnek lett alávetve. A teszt eredményei a (7.1.) táblázatban találhatók.

	első sorozat	második sorozat
sikeres detektálás:	93%	78%
Ta ₂ O ₅ fals negatív:	4%	0%
Ta ₂ O ₅ fals pozitív:	6%	20%
VO ₂ fals negatív:	0%	0%
VO ₂ fals pozitív:	4%	0%

7.1. táblázat. A neurális pulzust kiváltó detektoráramkör detektálási statisztikája

Ezek alapján elmondható, hogy míg az egyedi memrisztorok vizsgálatánál tapasztaltaknál a VO₂ bizonyult a problémásabbnak, addig az összekapcsolt áramkörben a Ta₂O₅ okozta a legtöbb hibát. Ez érthető is, hiszen az állt közvetlen kapcsolatban a bemeneti jellel, ami tartalmazhatott olyan kilengéseket a zajban, amit összekeverhetett a detektálni kívánt jellel. Az erőfeszítéseink jó előfutárai lehetnek egy gyakorlatban is alkalmazható detektor megvalósításnak, viszont a memrisztorok gyártási technológiájának fejlődésére még várunk kell néhány évet, amíg nagy számú, megbízhatóan beállított paraméterekkel rendelkező mintákat tudunk gyártani.

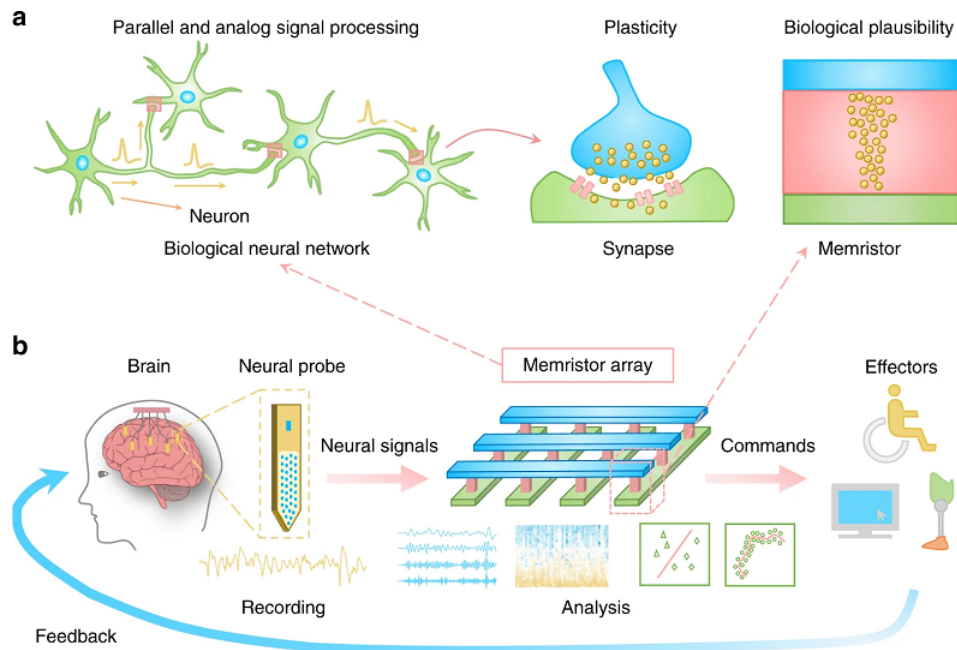
7.3. Kitekintés, a detektor áramkör alkalmazási lehetőségei

Az áramkör paramétereit finomítva, az aktív komponenseket lecsökkentve elméletileg alkalmazható lehet a vizsgált összeállítás egy komplex neurális hálózat modellezésére is, ahol a külső érzékelő rétegben lévő Ta₂O₅ memrisztor a külvilágból érkező pulzusokat ismerné fel egyfajta receptorként, amit az oszcillátor áramkör segítségével megoldott tűske alakú válasz jelezhetne a következő rétegben lévő interneuronoknak.

Egy másik hasznosítási terület lehet még az alacsony fogyasztású jelfeldolgozó eszközök. Sok esetben nem tudunk elég kompakt megoldást nyújtani egy zajjal terhelt jel feldolgozására. Eerre jelenthet megoldást az általunk vizsgált detektoráramkör alkalmazása. Nyilvánvalóan ehhez aktív komponensek nélkülivé kéne tenni az áramkört, hiszen ekkor lehetne igazán kihasználni a memrisztorokban rejlő alacsony energiafogyasztás előnyeit. Ezzel a bemeneti analóg jel egy lépésben megfelelő bemeneti formába hozható például egy tüzelő neurális hálózat számára. Utóbbinak alapját képezi, hogy a hálót felépítő

mesterséges neuronok között a biológiai megvalósításhoz hasonlóan pulzusok formájában terjed a jel rétegről rétegre [25].

Az összeállítás többek között a sok csatornás, zajjal terhelt jelek feldolgozásában jelenthetne radikális fejlesztést. Ilyenek például a robotok érzékelői által a külvilágból összegyűjtött adatok, az önvezető autók detektorai, vagy az agy-gép interfész hardvereknél használt elektrokoktográfia jelfeldolgozása. Talán az utóbbi feladat kapcsolható legjobban a munkánkhoz, mivel ebben az esetben is egy zajos bemeneti feszültségjelekből próbáljuk kinyerni az egyes idegsejtek tüzelésére utaló feszültségpulzusokat. A neuronok sűrű elhelyezkedése miatt az egyes idegsejtek jelének kiszűrése a többi neuron által keltett pulzustengerben különösen nehéz feladat lehet, nem is beszélve a jelfeldolgozáshoz szükséges eszközökről. Az agy-gép interfészek lehetőséget nyújtanak, hogy valós időben monitorozzuk a biológiai agytevékenységeket. A legjobb megoldást az agyi jelek felvételére leginkább az invazív érzékelés jelenti. Ebben az esetben elektródákat helyeznek az agyba, és az azokkal felvett jeleket értékeli ki valamilyen külső egység segítségével. Ehhez viszont az élőlény közelében kell maradni a feldolgozó egységünkkel, ami például mozgás közben nehezen kivitelezhető. Számos kutatás szerint memrisztorokkal felépített, könnyen integrálható, kompakt méretű detektorokkal, és a hasonló elven működő, alacsony fogyasztású memrisztor neurális hálózattal felépített agy-gép interfészek jelenthetik a jövőt az idegtudomány területén.



7.5. ábra. **a** A memrisztorok használatának motivációja a neurális jelek feldolgozása során. A memrisztorok az idegi szinapszisokkal analóg viselkedést mutatnak, hiszen mindkettő szinaptikus plaszticitással rendelkezik (az állapotuk megváltoztatásával) a rajtuk áthaladó töltéshordozók hatására, illetve mindkettő képes közvetlen analóg jelek feldolgozására, ahogy fentebb demonstrálásra került. Memrisztorhálóok alkalmazásával párhuzamosíthatók a számítási folyamatok (azok ellenállásértékeinek együttes kiolvasása hatékony mátrixszorzást tesz lehetővé, így alkalmassá téve a neurális hálóok kevésbé energiaigényesebb megvalósítására [26].) **b** Egy lehetséges agy-gép interfész megvalósításának diagramja. A neurális aktivitásból felvett adatot memrisztor hálókkal elemezve gyors választ nyújthatunk az egyes agy-gép interfész alkalmazások neuron-végrehajtó szerv kapcsolataihoz. [27].

8. fejezet

Összefoglalás

A kutatásom során egy memrisztor alapú neurális dinamikát mutató detektor áramkör megvalósíthatóságát vizsgáltam, majd azt a munkám végén témavezetőim segítségével gyakorlatba ültetve is demonstráltam. Az áramkör vizsgálatához a kutatócsoportunk által fejlesztett memrisztor modelleket alkalmazva szimuláltam a vizsgált Ta_2O_5 memrisztorok idegsejtekhez hasonlítható viselkedését, illetve a VO_2 memrisztorok oszcillátorként felhasználható tulajdonságát. Bemutattam, hogy a Ta_2O_5 memrisztor idegsejtekhez hasonló viselkedést produkálhat a megfelelő áramköri összeállításokban. Ezzel kapcsolatban a szimulációs paramétereket felhasználva rövid- és hosszútávú memóriajelenségeket figyelhettem meg, illetve a beérkező pulzusok gyakoriságától függő kapcsolási mintákat is sikerült demonstrálni. Az egyedi viselkedések kapcsolási paramétereinek elemzése után a két memrisztor tulajdonságát összekapcsolva szimuláltam egy zajos háttérben lévő Gauss-os feszültségpulzus detektálását lehetővé tevő áramkört. Az áramkör a Ta_2O_5 segítségével a memóriatulajdonságait felhasználva detektálta a pulzust, amit ellenálláseséssel jelzett a VO_2 oszcillátor áramkörnek, ami arra jól felismerhető oszcillációval válaszolt. A kapcsolást gyakorlatban is sikerült demonstrálni. Ezen felül sikerült visszacsatolni a VO_2 jelét a Ta_2O_5 -ra, amivel elértük, hogy az összeállítás neurális tüske jellegű választ produkáljon. A tüskét továbbítva egy másik egységnek neurális hálózatok építőelemeként használhatjuk a vizsgált áramkört. A gyakorlatban az alacsony energiafogyasztású, kompakt eszközökkel történő jeldetektálás területén lehet hasznosítható a berendezés. Ehhez viszont sokkal pontosabb memrisztorokra van szükségünk, hogy azok kapcsolási küszöbparamétereit megfelelően megválaszthassuk az optimális energiafelhasználás érdekében.

Köszönetnyilvánítás

Hálával tartozok témavezetőimnek a hasznos tanácsokért és a sok segítségért, amit a laborban töltött munkám során kaptam tőlük. Köszönöm Török Tímeának a hasznos tanácsokat a szimulációk elkészítése kapcsán, illetve, hogy bevezetett a VO_2 memrisztorok működésének világába. Szeretném megköszönni Molnár Dánielnek, hogy segített a Ta_2O_5 memrisztorok mérésében, és az összekapcsolt detektoráramkör kivitelezésében. Örülök, hogy segíthettem megvalósítani a végső tüzelő dinamikát megvalósító kapcsolást. Köszönettel tartozok Prof. Halbritter Andrásnak a hasznos diszkussziókéért a komplex kapcsolások és fizikai jelenségek megértését illetően, illetve Dr. Csontos Miklósnak a Ta_2O_5 mintákért, valamint Dr. Pósa Lászlónak a mérőprogram, és a VO_2 minták elkészítéséért. Végül szeretném megköszönni a családom támogatását, ami nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

Irodalomjegyzék

- [1] S. B. et al. Eryilmaz. Neuromorphic architectures with electronic synapses. in 17th international symposium on quality electronic design (isqed). *118–123 (IEEE, Santa Clara, CA, USA)*, 2016.
- [2] Ji-Ho Ryu, Chandreswar Mahata, and Sungjun Kim. Long-term and short-term plasticity of ta2o5/hfo2 memristor for hardware neuromorphic application. *Journal of Alloys and Compounds*, 850:156675, 2021.
- [3] Yao Shuai, Xinqiang Pan, and Xiangyu Sun. Spike-timing-dependent plasticity in memristors. In Alex Pappachen James, editor, *Memristor and Memristive Neural Networks*, chapter 13. IntechOpen, Rijeka, 2017.
- [4] Czumpfné Rátkai Erika Anikó. *Aktivitás-függő plaszticitás hatásának vizsgálata az idegsejtek hálózati működésére. Doktori értekezés.* 2021.
- [5] L. Chua. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18(5):507–519, 1971.
- [6] L.O. Chua and Sung Mo Kang. Memristive devices and systems. *Proceedings of the IEEE*, 64(2):209–223, 1976.
- [7] L.O. Chua. If it’s pinched, it’s a memristor. *Semicond. Sci. Technol.*, 29(2):209–223, 2014.
- [8] Dmitri Strukov, Gregory Snider, Duncan Stewart, and Stan Williams. The missing memristor found. *Nature*, 453:80–3, 06 2008.

- [9] Baker Mohammad, Maguy Abi Jaoude, Vikas Kumar, Dirar Mohammad Al Homouz, Heba Abu Nahla, Mahmoud Al-Qutayri, and Nicolas Christoforou. State of the art of metal oxide memristor devices. *Nanotechnology Reviews*, 5(3):311–329, 2016.
- [10] Dániel Molnár, Tímea Nóra Török, Botond Sánta, Agnes Gubicza, András Magyar-kuti, Roland Hauert, Gábor Kiss, András Halbritter, and Miklós Csontos. In situ impedance matching in nb/nb2o5/ptir memristive nanojunctions for ultra-fast neuromorphic operation. *Nanoscale*, 10:19290–19296, 2018.
- [11] Khare N. Munjal, S. Valence change bipolar resistive switching accompanied with magnetization switching in cofe2o4 thin film. *Sci Rep* 7, 12427, 2017.
- [12] Xun Luo Hongjie Jin Ping Shao, Zewei Cao. Recent progress in the phase-transition mechanism and modulation of vanadium dioxide materials. *NPG Asia Materials*, 581:605, 2018.
- [13] Yue Wang, Kyung-Mun Kang, Kim Minjae, Hong-Sub Lee, Rainer Waser, Dirk Wouters, Regina Dittmann, Jianhua Joshua Yang, and Hyung-Ho Park. Mott-transition-based rram. *Materials Today*, 28, 07 2019.
- [14] Yasin Oğuz. Mathematical modeling of memristors. In Alex Pappachen James, editor, *Memristor and Memristive Neural Networks*, chapter 9. IntechOpen, Rijeka, 2018.
- [15] Balázs Péter. *Komplex jelek feldolgozása egyedi memrisztorok, és pár memrisztorból készített döntéshozó hálózatok szimulációjával. TDK dolgozat.* 2019.
- [16] Shyam Adhikari, Maheshwar Sah, Hyongsuk Kim, and Leon Chua. Three fingerprints of memristor. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 60:3008–3021, 11 2013.
- [17] Tarsoly Emil. *Anatómia.* Akadémiai Kiadó, 2020.
- [18] Ami Citri and Robert C. Malenka. Synaptic plasticity: Multiple forms, functions, and mechanisms. *Neuropsychopharmacology*, 33(1):18–41, Jan 2008.

- [19] David Beeman. *Hodgkin-Huxley Model*, pages 1–13. Springer New York, New York, NY, 2013.
- [20] Jiajie Ying, Yan Liang, Guangyi Wang, Peipei Jin, Long Chen, and Guanrong Chen. Action potential and chaos near the edge of chaos in memristive circuits. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 32(9):093101, 2022.
- [21] Yi Wei, Kenneth K Tsang, Stephen K Lam, Xiwei Bai, Jack A Crowell, and Elias A Flores. Biological plausibility and stochasticity in scalable vo2 active memristor neurons. *Nature communications*, 9(1):1–10, 2018.
- [22] Ruopeng Wang, Jia-Qin Yang, Jingyu Mao, Zhanpeng Wang, Shuang Wu, Maojie Zhou, Tianyi Chen, Ye Zhou, and Su-Ting Han. Recent advances of volatile memristors: Devices, mechanisms, and applications. *Advanced Intelligent Systems*, 2, 07 2020.
- [23] Miklós Csontos, Yannik Horst, Nadia Jimenez Olalla, Ueli Koch, Ivan Shorubalko, András Halbritter, and Juerg Leuthold. Picosecond time-scale resistive switching monitored in real-time, 2022.
- [24] László Pósa, Gyorgy Molnar, B. Kalas, Zsófia Baji, Zsolt Czigány, Peter Petrik, and János Volk. A rational fabrication method for low switching-temperature vo2. *Nanomaterials*, 11:212, 01 2021.
- [25] Filip Ponulak and Andrzej Kasiński. Introduction to spiking neural networks: Information processing, learning and applications. *Acta neurobiologiae experimentalis*, 71:409–33, 01 2011.
- [26] Xiaoyang Liu and Zhigang Zeng. Memristor crossbar architectures for implementing deep neural networks. *Complex & Intelligent Systems*, 8(2):787–802, Apr 2022.
- [27] Zhengwu Liu, Jianshi Tang, Bin Gao, Peng Yao, Xinyi Li, Dingkun Liu, Ying Zhou, He Qian, Bo Hong, and Huaqiang Wu. Neural signal analysis with memristor arrays towards high-efficiency brain–machine interfaces. *Nature Communications*, 11(1):4234, Aug 2020.