



PÁZMÁNY *1635*  
—*alaptíva*—

# Pázmány Péter Catholic University

## Faculty of Information Technology and Bionics

1083 Budapest, Práter u. 50/A

Tel.: 886-4700

csaba.gyorgy@itk.ppke.hu

---

### **Bírálat Török Nóra Tímea „Development and investigation of ultra-small on-chip resistive switching memory devices” c. doktori értekezéséről**

Nagy élvezettel olvastam Török Tímea disszertációját, és hadd kezdjem azzal, hogy kiemeljem, mi tetszett a legjobban a munkában. A szerző magas szinten tárgyalja a tématerület fizikai oldalát (zajmérések, rezisztív kapcsolások modellezése), otthonosan mozog a gyártási technológiákban és a minták karakterizálásában, és mindezen eredmények lehetséges mérnöki alkalmazása is kiváló tárgyalást kap. Nagyon kevés doktori disszertációval találkozom, amely ilyen széles területen mutat fel magas szintű tudományos eredményeket.

A disszertáció második fejezete nagyívű áttekintést ad a rezisztív kapcsoló memóriák főbb típusairól és történetéről. Kiváló és tömör áttekintése ennek a nagyon gazdag irodalommal rendelkező területnek. Nagyon jó áttekintést tartalmaz az irodalomból fellelhető hardware neurális hálókról.

A harmadik fejezet különböző on-chip rezisztív kapcsolók gyártási technológiáját és elektronikus karakterizációját ismerteti. Nagyon sokféle eszközt és ezek specifikus problémáit tárgyalja, a méréseket és a gyártást természetesen nagyobb kutatócsoport tagjaként végezte. Ez a fejezet rengeteg információt, adatot tartalmaz, és talán több önálló fejezetre lett volna bontható, a lényegyet, főbb eredményeket és a tézisekkel való kapcsolatot hangsúlyozva fejezetenként. A fejezet legfontosabb eredményei az OxRam eszközök zajméréseihez kapcsolódnak, illetve a VO<sub>2</sub> eszközök dinamikus viselkedésének finomhangolásához.

A harmadik fejezetben alkalmazások szempontjából talán a legfontosabb a szerző által 'neurodinamikus' viselkedének nevezett jelenségcsoport. Általánosságban, a rezisztív kapcsolókat leggyakrabban 'statikus' neurális hálók építőelemeiként használják, az eszköz dinamikus viselkedése másodrendű. A dinamikus viselkedés kutatása, időfüggő jeleket detektáló / feldolgozó neurális hálók kutatása ígéretes és új terület.

A nagyfrekvenciás kapcsolás vizsgálata és a nagyfrekvenciás mérőeszköz kifejlesztése szintén igen fontos eredmény, mivel a köztudatban lassúnak hitt működés a rezisztív kapcsolók alkalmazásának egyik fő kerékkötője.

A negyedik fejezet azt vizsgálja, miképpen hangolhatók a rezisztív kapcsolók sztochasztikus kapcsolási tulajdonságai. Ezek a mérések egyrészt betekintést adnak a kapcsolási folyamat fizikájába, másrészt fontos, hangolható paraméterek lehetnek olyan alkalmazásokban, ahol a

kapcsolási dinamika szerepet játszik. Mint a szerző többször hangsúlyozza, a neurális hálók működésében a sztochasztikus viselkedés nem feltétlenül szükséges rossz, hanem a számítás hatékonyságában, gyorsaságában, megbízhatóságában szerepet játszik.

Az ötödik fejezet kvantum transzportméréseket mutat be Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> és Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> eszközökön. A mérések betekintést engednek a filamentek vezetési mechanizmusaira és azokra az atomi méretű (kvantumellenállással leírható) vezetési tartományokra, amelyek az eszköz ellenállását meghatározzák.

A hatodik fejezet egy mérnöki (bionikai) alkalmazást mutat be. Ebben a vanádium-oxid rezisztív kapcsolókból felépülő oszcillátorok auditív jelek frekvenciájára vannak hangolva. Ez megteremti a lehetőséget arra, hogy a VO<sub>2</sub> kapcsolókból felépült áramkörök közvetlenül audio jeleket dolgozzanak fel.

Mint a bevezetőben is jeleztem, a dolgozat egyik nagy értéke az, hogy mind a kapcsolóelemek fizikájában, mind az alkalmazási lehetőségekben egyaránt magas szintű értékes eredményeket tartalmaz. A munkából kiváló publikációk is születtek, és a jelölt több sikeres Ms és Bs munkát is vezetett, ezek eredményei is bekerültek a dolgozatba. Mindenütt világos mi a jelölt és kollegai hozzájárulása az eredményekhez. A jelölt cikkei közül a régebben megjelentek már igen jó idézettséggel büszkélkedhetnek, ami egy ilyen kompetitív területen komoly eredménynek számít.


A tézisek eredeti tudományos eredményként elfogadhatók, a munka védelemre bocsátható. A publikációk magas minőségűek és három elsőszerzős cikk is szerepel közöttük. A hallgató hozzájárulása (pl. minták készítésében) nélkülözhetetlen volt a nem első szerzős publikációk létrejöttéhez is. Véleményem szerint a dolgozat lényegesen túlteljesíti egy doktori disszertációtól elvárható minimális követelményeket – az eredmények mennyiségére talán két PhD munkára is elegendő lennének.

Néhány kérdés, ami felmerült bennem a munka olvasása során:

1. Nem világos számomra, hogyan lehet általánosítani az 1.4 K-es hőmérsékleten végzett kvantumtranszport-méréseket az eszközök szobahőmérsékletű viselkedésére. Ugyanezek lesznek a vezetési mechanizmusok szobahőmérsékleten is érvényesek? Elképzelhető hogy a filamentek formálódása teljesen másképp zajlik szobahőmérsékleten?
2. A dolgozat részletesen tárgyalja a vizsgált eszközök zajméréseit, vezetési mechanizmusait. A lehetséges alkalmazások szempontjából az egyik legfontosabb paraméter az eszköz kapcsolásához szükséges energia (eldisszipált energia), illetve a minimális feszültség amivel a kapcsolók működni tudnak – ez utóbbit az eszközök variabilitása mellett a zajszint határozza meg. Tudna ezekről a paraméterekről becslést adni?
3. A jelölt egyik cikkében (Quantum Transport Properties of Nanosized Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Resistive Switches: Variable Transmission Atomic Synapses for Neuromorphic Electronics) szerepel a kitétel, hogy "This transmission variability facilitates neuromorphic electronic applications in nanosized artificial synapses reaching the ultimate atomic scale." – vagyis a kvantumtranszport-mérések szerint a rezisztív kapcsolók atomi méretűvé skálázhatók. Technológiailag lehetséges lenne valóban a junction-okat ilyen mérettartományba csökkenteni, vagy az eszközök közötti paraméterek szorítása, a filament képződésének statisztikai természete nem teszi lehetővé az nagyszámú ilyen eszköz nanométeres tartományba skálázását?

4. A dolgozat végén, a 6.4-es pontban ("Circuit for auditory sensing") nem teljesen világos számomra, hogy pontosan milyen jelfeldolgozási funkciót valósít meg az áramkör. Egy hangolható szűrőként viselkedik a VO2 oszcillátor vagy ennél komplikáltabb a funkciója? Lehetséges lenne nagyobb számú VO2 eszközt használni komplikáltabb jelfelismerési feladatok megoldására? Nagyon szeretnék erről több részletet hallani!

Budapest, 2023 Április 17



Dr. Csaba György