

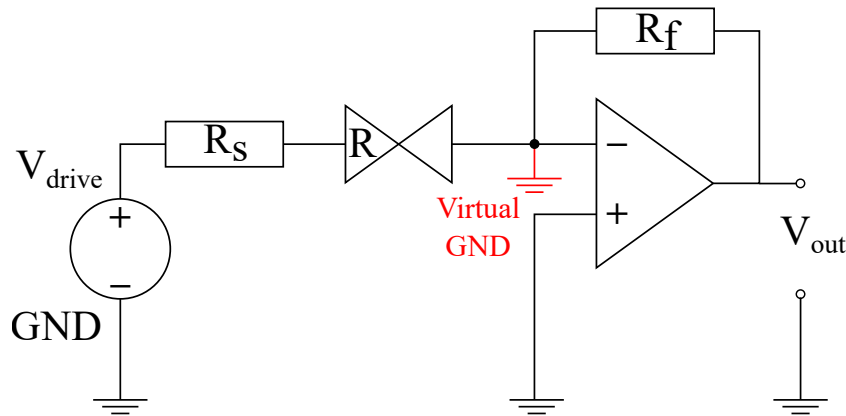
# Válaszok Dr. Szabó István opponensi kérdéseire

Atomi folyamatok rezisztív kapcsolókban:  
fluktuációktól a reverzibilis atomi átrendeződésekig

Nyáry Anna

- 1. A kísérleti módszerek ismertetése során a 3.2. ábrán blokkvázlatszerűen mutatja be a mérőelrendezés elemeit. Sajnos az ábra alapján nem világos, hogy az analóg oldalon pontosan hogy is néz ki az elrendezés, hová kapcsolódik a  $V_{drive}$  feszültség az áramkörben, hogy kapcsolódik az áramerősítő a mért áramkörhöz és hol van a rendszer földpotenciálra kötve, illetve árnyékolva. Kérem, hogy ezt részletesebben ismertesse, különös tekintettel arra, hogy hasonló elrendezést használ a zajmérés során is.**

A bíráló kérdése a leírás alapján minden bizonnyal a 3.13-as ábrára vonatkozik, ami bemutatja a rezisztív kapcsolások vizsgálatára használt mérési elrendezést. Ebben az elrendezésben a National Instruments USB-6363 adatgyűjtő kártya által kiadott  $V_{drive}$  meghajtó feszültség közvetlenül egy BNC-kábel belső erére van kiadva, míg kábel árnyékolása a földpotenciál. A zajmérés esetén az Agilent 33220A függvénygenerátor hasonló módon adja ki a feszültséget BNC-kábelen. A  $V_{drive}$  feszültség a soros ellenálláson és a mintán esik, melyek után a Femto DLPCA-200 áramerősítő van kötve. Végül az áramerősítő kimenete az adott elrendezésben használt adatgyűjtő kártya bemenetére megy. A földpotenciál a BNC-kábel használatával a mintatartó fémdobozra, az áramerősítő házára és az adatgyűjtő bemenetének árnyékolására van kötve. Az 1. ábra mutatja be az egyszerűsített mérési elrendezést a földpotenciálok jelölésével, valamint egy ideális invertáló műveleti erősítővel modellezve a Femto áramerősítőt. Az ideális műveleti erősítő működéstől azt várjuk, hogy az invertáló bemeneten 0 V jelenjen meg, ezért ezt a pontot virtuális földpontnak (*virtual GND*) szokás nevezni.



1. ábra. Mérési elrendezés egyszerűsített képe. A feszültségforrás  $V_{\text{drive}}$  feszültséget ad ki a földpotenciálhoz képest, ami az  $R_s$  soros ellenálláson és az  $R$  mintán esik. A minta után kapcsolt ideális invertáló műveleti erősítő  $R_f$  visszacsatoló ellenállással  $V_{\text{out}}$  feszültséget ad ki.

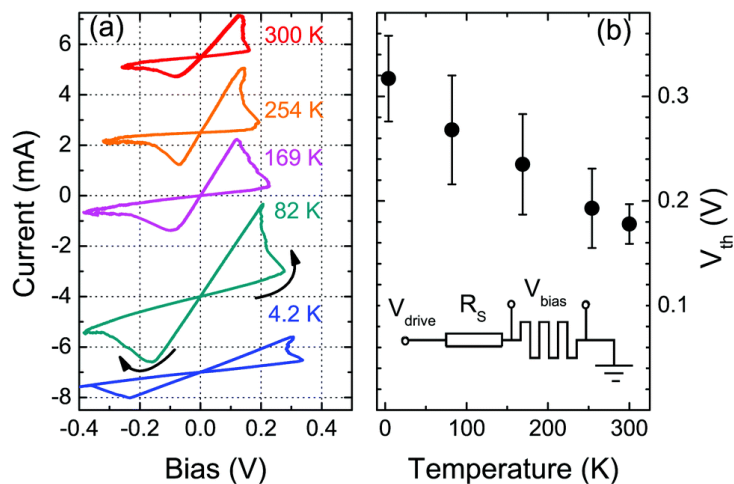
**2. A bemetszett vezeték alkalmazó mechanikailag kontrollált törőkontaktus mérését alacsony hőmérsékleten végezte el, a többi esetben a mérések szobahőmérsékleten történtek. Milyen hatása lehet a mérési eredményekre a mérés hőmérsékletének, befolyásolhatta-e ez az összehasonlítások eredményét?**

Szobahőmérsékletű tiszta atomi kapcsolása az irodalomban csak egyedi kapcsolások erejéig jelent meg, amik a küszöbfeszültség sztochasztikus viselkedésére utalnak, de statisztikai elemzések nem készültek. Ilyen méréseket mutatott be tiszta aranyon a dolgozat 3.8-as ábrája, valamint a saját, nanolitografált tiszta ezüst mintán mért 3.43-as ábra. Megemelkedett hőmérsékleten az atomok növekvő termikus mozgása miatt zajosabb kapcsolási görbékre számíthatunk, ami megnehezítheti a statisztikai elemzéshez szükséges hosszúságú méréseket.

Fontos megjegyezni, hogy a tiszta atomi kapcsolások vizsgálatakor a szobahőmérsékleti energiaskála ( $k_{\text{B}}T = 25,7 \text{ meV}$ ) a kapcsolási feszültségekhez tartozó energiához, az 1 eV-os nagyságrendhez képest sokkal kisebb. Ez a különbség a modellben is szemléletesen megmutatható, ha kiszámoljuk a vizsgált fononmódus egyensúlyi átlagos betöltési számát a két energiaskálán. Míg a szobahőmérsékleti energia egy fonon gerjesztésére sem elegendő, addig azt kapjuk, hogy majdnem két nagyságrenddel nagyobb a feszültségből gerjesztett átlagos betöltési szám, körülbelül 5 fonon az 1 V-os feszültséghez. Ez alapján arra számíthatunk, hogy a hőmérséklet növelése ugyan rásegít a folyamatra (alacsonyabb lehet a kapcsolási köszöb), de a kapcsolat jellegét érdemben nem befolyásolja.

Emellett érdemes a memrisztív kapcsolások alacsony hőmérsékleti megvaló-

sítát is tanulmányozni.  $\text{Ag}_2\text{S}$ -alapú memrisztív kapcsolások hőmérsékletfüggését vizsgálta kutatócsoportunk egy korábbi publikációja [1], melynek eredményei a 2. ábrán vannak összefoglalva. Az (a) panelen láthatóak  $I(V)$ -kapcsolások, a (b) panelen pedig a csökkenő átlagos kapcsolási feszültség és annak csökkenő szórása a hőmérséklet függvényében. Itt is azt tapasztalhatjuk, hogy a hőmérséklet a kapcsolást elősegíti.



2. ábra.  $\text{Ag}_2\text{S}$ -alapú memrisztív kapcsolás (a)  $I(V)$ -görbái és (b) átlagos kapcsolási feszültségei a hőmérséklet függvényében [1].

Ezen eredmények alapján elképzelhető, hogy a memrisztív kapcsolások alacsony hőmérsékleten megemelkedett, akár a tiszta atomi kapcsolásokkal összemérhető szórást mutassanak. Azonban legnyilvánvalóbb különbség a kétféle kapcsolások között az  $I(V)$ -karakterisztikák alakjában jelenik meg, ami nem hőmérsékletkülönbség számlájára írható, hanem a minta méretskálája és az alapvető kapcsolási folyamat fizikai háttere határozza meg.

### 3. Van-e különbség a törőkontaktusos kísérletek esetében az első tézispontban szereplő bemetszett vezetékes és a második tézispontban szereplő nanofabrikált törőkontaktusok viselkedése között?

Az atomi kapcsolások nagy mechanikai stabilitást igényelnek, amit a bemetszett vezetékes törőkontaktus technikával csak alacsony hőmérsékleten lehet elérni, míg a nanofabrikált törőkontaktus minták esetén akár szobahőmérsékleten is. Azonban, ahogy az a 3.43-ás ábrán bemutatott, nanofabrikált mintán mért kapcsoláson látszik, az atomi kapcsoló egyedi állapotai zajosabbak. Míg a bemetszett vezetékes törőkontaktus technikával alacsony hőmérsékleten atomi kapcsolás akár órákig

reprodukálhatóan fenntartható, addig tapasztalataim alapján a nanofabrikált törőkontaktus minták esetén szobahőmérsékleten ekkora stabilitás nem érhető el. Szobahőmérsékleten ugyanis jelentős lehet az atomok termikusan gerjesztett diffúziós mozgása, ami a stabilitás romlását okozhatja. A nanofabrikált törőkontaktus mintáknak egy további hátránya, hogy sokkal érzékenyebbek elektrosztatikus kisülésekre, mivel a törőkontaktus egy vékonyrétegű hídban jön létre, ami egy feszültségimpulzus hatására fel tud robbani. Egy további fontos szempont volt az én munkám során, hogy a tiszta atomi kapcsolások megértése érdekében garantálni kell a tiszta környezetet. A vákuum mellett az alacsony hőmérséklet is jelentősen javít a tisztaságon, ugyanis a kriogén vákuumban az esetleges szennyezők a mintatartó felületére kondenzálnak, ezzel garantálva a tiszta fémbe tiszta atomi kapcsolásokat.

A felsoroltak közül két szempont, a mechanikai stabilitás és a tisztaság a nanofabrikált minták esetében alacsony hőmérsékleti mérésekkel javítható, mivel nem a mintakészítés, hanem a szobahőmérsékleti mérés okozza az említett hátrányokat. Ugyanolyan körülmények között bemetszett és nanofabrikált mintában mért atomi kapcsolások között nem számítok fizikai különbségekre.

**4. A dolgozatban megállapítja, hogy sok lényeges fizikai folyamatot nem tartalmaz a modell, ezért kvantitatívabb egyezés nem várható. Lenne-e lehetőség a modell kiterjesztésére a kapcsolási folyamat több részletének megragadásával, például a potenciális energiatérkép feszültségfüggésének figyelembevételével?**

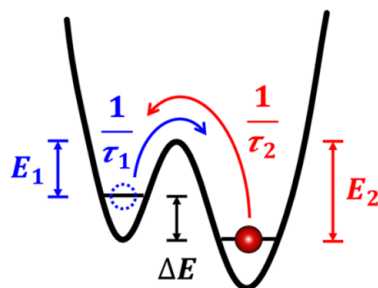
A modell kiterjesztéséhez első körben fizikailag indokolható módon kell meghatározni a potenciális energiatérkép feszültséggel vagy a geometriával változó mértékét. Ehhez *ab initio* számításokra lehetne támaszkodni, melyek konkrét atomi geometriákra kiszámítva tudnának adni egy energiaküszöböt. Ilyen számításokkal találkozhatunk az irodalomban [2], ezeket a fononrendszer feszültségfüggésével lehetne kiegészíteni. Megjegyzem, hogy a modellünkben figyelembe vett elektron-fonon kölcsönhatásokon túl azonban más effektusok is fontos szerepet játszhatnak, mint például az atomok közötti kötések gyengülése a feszültség hatására [3].

A potenciális energiatérkép változását a modellben az  $E_b$  küszöbenergia, vagyis a szükséges  $n^* = E_b/E$  fonongerjesztések számára tudjuk lefordítani. Ez a szimulációban könnyen megvalósítható, mivel csupán annyit jelentene, hogy a  $P$  valószínűségi mátrix  $n^* \times n^*$  dimenzióját változtatjuk a feszültség változtatásakor. Ezzel ellentétben nehezen implementálható egy ciklusról-ciklusra való változása a potenciális energiatérképnek, amivel például a ciklusról-ciklusra változó geometriai különbségeket lehetne modellezni. Ennek oka, hogy a szimuláció nem egyedi kapcsolásokat modellez, hanem azt adja meg, hogy adott feszültségérték esetén milyen

valószínűséggel tartózkodik a rendszer az egyes betöltési számú állapotokban.

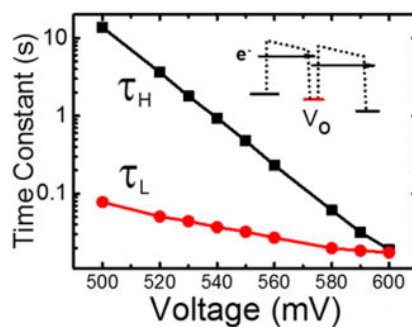
**5. Az előző [3.] fejezetben a kapcsolat leírására használt egyszerű modellt ki lehetne-e terjeszteni a zaj modellezésére?**

Az  $1/f$ -zaj alapját képező egyedi fluktuátorokat tipikusan egy kétállapotú rendszerként írják le, melynek állapotai közötti ugrálás termikusan aktivált folyamat. A 3. ábra mutatja be egy ilyen rendszer illusztrációját a releváns paraméterek jelölésével. Láthatjuk, hogy a tiszta atomi kapcsolat leírására használt modellhez



3. ábra. Egy kétállapotú rendszer állapotai közötti ugrálással írható le egy zajt okozó fluktuátor [4].

hasonló modell egyedi fluktuátorokat tudna leírni. A kísérletekben egyedi fluktuátort tipikusan akkor tudunk elkülönülten megfigyelni mind az áramjelben, mind a zajban, ha annak amplitúdója kiemelkedik a többi fluktuátor háttéréből. Ilyen egyedi fluktuátorok viselkedését vizsgálták egy  $\text{TaO}_x$ -alapú memrisztorról szóló publikációban [5], melynek eredményeit a 4. ábrán egy kétállapotú modell alapján magyarázzák. A nagy ellenállású állapotban a feszültség függvényében figyelték



4. ábra.  $\tau_L$ , illetve  $\tau_H$  a 3. ábra  $\tau_1$ , illetve  $\tau_2$  időállandóinak felel meg [5].

meg az időállandók jelentős csökkenését, amit a feszültséggel csökkenő energiaküszöbökkel hoztak összefüggésbe. Egy ilyen megfigyelés a zajspektrumokban egy kiemelkedő Lorentz-spektrum feszültséggel nagyobb levágási frekvenciák irányába való tolódását jelentené, amit saját méréseim során gyakran meg is tudtam figyelni.

**6. Nem teljesen világos, hogy a javasolt kapcsolási küszöbérték stratégia a zajmentesítésre a gyakorlatban hogy valósítható meg az eszköz tényleges alkalmazása során amennyiben a ciklus alkalmazása utáni állapot is véletlenszerűen lehet alacsony vagy magas zajú, ha jól értelmezem az eredményeket.**

A hatékony zajmentesítéshez a gyakorlatban ismerni kell az eszköz zajtérképét, vagy legalábbis szükség van arra, hogy ismerjük az adott vezetőképességhez tartozó tipikusan elérhető minimális zajszintet, amit elérve/megközelítve adaptívan leállíthatjuk a zajhangolási protokollt egy ciklus után, ami alacsony zajt eredményezett. Alternatívan pedig elég egy alacsony zajszint elérésekor megállni, ha ugyanis a zajszint már a kívánt alkalmazás szempontjából megfelelően alacsony, akkor nincsen feltétlenül szükség az lehető legalacsonyabb zaj elérésére. Egy hasonló zajmentesítő stratégiát mutat be Rao *et al.* [6], amikor az egyedi vezetőképesség-állapotokat pulzusokkal addig hangolták, amíg az 11 bites felbontásnak megfelelő zajt elérték.

## Hivatkozások

- [1] A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter és G. Mihály, “Resistive switching in metallic Ag<sub>2</sub>S memristors due to a local overheating induced phase transition”, *Nanoscale* **7**, 11248–11254 (2015).
- [2] M. Englund, M. Brandbyge és A. P. Jauho, “Atomistic theory for the damping of vibrational modes in monoatomic gold chains”, *Phys. Rev. B* **80**, 045427 (2009).
- [3] N. Papior, S. Leitherer és M. Brandbyge, “Simple approach to current-induced bond weakening in ballistic conductors”, *Physical Review B* **106**, 155401 (2022).
- [4] S.-S. Yeh, C.-Y. Yu, Y.-T. Lee, S.-P. Chiu és J.-J. Lin, “Probing Thermally Activated Atomic and Nanocrystalline Defect Motion Through Noise Processes in RuO<sub>2</sub> Nanowires”, *Phys. Rev. Appl.* **14**, 024050 (2020).

- [5] Y. Pan, Y. Cai, Y. Liu, Y. Fang, M. Yu, S. Tan és R. Huang, “Microscopic origin of read current noise in TaOx-based resistive switching memory by ultra-low temperature measurement”, *Applied Physics Letters* **108**, 153504 (2016).
- [6] M. Rao, H. Tang, J. Wu, W. Song, M. Zhang, W. Yin, Y. Zhuo, F. Kiani, B. Chen, X. Jiang, H. Liu, H.-Y. Chen, R. Midya, F. Ye, H. Jiang, Z. Wang, M. Wu, M. Hu, H. Wang, Q. Xia, N. Ge, J. Li és J. J. Yang, “Thousands of conductance levels in memristors integrated on CMOS”, *Nature* **615**, 823–829 (2023).