

OTDK dolgozat

Nanométeres skálájú memrisztorok kapcsolási dinamikájának kísérleti vizsgálata

Gubicza Ágnes

Msc II. évfolyam, BME TTK

TÉMAVEZETŐK: DR. HALBRITTER ANDRÁS
TANSZÉKVEZETŐ EGYETEMI DOCENS
BME FIZIKA INTÉZET
FIZIKA TANSZÉK

DR. CSONTOS MIKLÓS
TUDOMÁNYOS MUNKATÁRS
BME FIZIKA INTÉZET
FIZIKA TANSZÉK

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1–2010-0009 "Új tehetséggondozó
programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program
támogatta.

2012. december 28.

Budapest

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Irodalmi áttekintés	3
2.1. A memrisztor, mint új áramköri elem	3
2.2. Az Ags rendszer tulajdonságai	4
3. A minták előállítása	6
4. Szobahőmérsékletű pontkontaktus mérőrendszer fejlesztése	8
4.1. A mérőrendszerrel szembeni elvárások	8
4.2. A mintatartó felépítése	8
4.3. A mérésvezérlő program	12
4.4. A mérőrendszer összeállítása	15
5. Mérési eredmények és diszkusszió	18
5.1. Feszültség-áram karakterisztikák	18
5.2. A kapcsolás vizsgálata feszültségimpulzusok segítségével	20
5.3. A relaxáció jellegének vizsgálata	22
6. Összefoglalás	26
7. Köszönetnyilvánítás	27
Hivatkozások	28

1. Bevezetés

Összefoglaló néven memrisztornak nevezzük az olyan passzív áramköri elemeket, amelyek ellenállásának értéke függ a rajtuk korábban átfolyt töltés mennyiségétől. Ebből következően feszültség-áram karakterisztikájuk hiszterézist mutat. A jelenség létét elméletben már a hetvenes évek elején megjósolták [1], majd különféle rendszereken kísérletileg is kimutatták [2], [3]. Az általam is vizsgált nanoméretű Ag_2S rendszer felé a 2000-es évek elején fokozott figyelem fordult [4], azonban még mindig számos nyitott kérdés van kapcsolásának mechanizmusát illetően.

A memrezisztív viselkedést mutató anyagok tanulmányozása kiemelkedően fontossá vált, ugyanis alkalmazásuk mind a számítástechnikában, mind a neurális hálózatok terén nagy előrelépést jelenthet. Egy néhány nanométeres memrisztoron tizedvolttal nagyságrendű feszültség hatására fémes állapotok közötti jelentős ellenállás-változást érhetünk el, ezáltal memrisztorok hálózatából analóg memória készíthető. Az ilyen eszközök méretüket és sebességüket tekintve a jelenleg forgalomban lévő memóriák ígéretes alternatívái lehetnek.

A BME Fizika Tanszék Szilárdtestfizika Laboratóriumában az elmúlt időszakban Ag_2S vékonyrétegek és fémes tűk nanométeres skálájú kontaktusainak kapcsolási jelenségeit vizsgálták [5]. A kontaktusok pozitív illetve negatív küszöbfeszültség hatására reprodukáló kapcsolást mutattak kis és nagy ellenállású állapotok között. Andrejev-spektroszkópiával vizsgálták a kialakuló vezetési csatornák számát és transzmisszióját.

Munkám során egy új mérőrendszert fejlesztettem, ami alkalmas a kapcsolások dinamikájának gyors mérésére szobahőmérsékleten. A mintatartóban a fémes tű rögzített, a vizsgálandó minta mozgatása pedig tisztán piezoelektromos mozgatókkal történik. Az így létrehozott kontaktusok stabilitása nagy, ezért a berendezés az ellenállás-változás rövid és hosszú távú vizsgálatára is alkalmas. A minta és a tű egy zárt térfogatban helyezkedik el, így a mérések vákuumban vagy tetszőleges védőgázban végezhetők.

Az elkészült mérőrendszerhez egy mérésvezérlő programot írtam, ami képes a piezoelektromos mozgatókat irányítani, automatikusan kontaktust létrehozni, a feszültség-áram karakterisztikákat tetszőleges amplitúdóval felvenni, ábrázolni és menteni.

Az elkészült mérőrendszerrel sikeresen elvégeztem az első méréseket. Ezek alapján kijelenthető, hogy a kapcsolat utáni relaxáció nem írható le egyetlen időállandóval, tehát nem exponenciális függést követ. Méréseim alapján megfelelően nagy feszültségnél a rendszer néhányszor tíz nanoszekundumos időskálán belül is jelentős kapcsolást mutat, azonban sok nagyságrenddel nagyobb időskálán is tapasztalható relaxáció.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A memrisztor, mint új áramköri elem

1971-ben tisztán elméleti megfontolások alapján Leon Chua az ellenállás, kapacitás és induktivitás mellett bevezetett egy új áramköri elemet, amit memrisztornak nevezett el [1]. A szó két angol kifejezés, a *memory* és a *resistance* összeolvasztásából keletkezett, ugyanis hipotézise szerint ennek az elemnek az ellenállása a rajta korábban átfolyt töltés mennyiségétől függ, tehát egyfajta memóriával rendelkező elem.

Az áramköri elemeket meghatározó négy alapvető mennyiség a töltés (q), fluxus (Φ), áramerősség (i) és feszültség (v). Két-két mennyiség között összesen 6 egyenlet írható fel. Ezek közül kettő az elektrodinamikai egyenletekből adott:

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\Phi(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} v(\tau) d\tau. \quad (2)$$

A maradék négy egyenlet közül három a már ismert áramköri elemek definíciós egyenlete:

- ellenállás (R): $dv = R(i)di$
- induktivitás (L): $d\Phi = L(i)di$
- kapacitás (C): $dq = C(v)dv$

Így egy egyenlet marad, ami a fluxus és a töltés között teremt kapcsolatot. Ha ez a kapcsolat a töltés egyértékű függvénye, azaz $d\Phi = M(q)dq$, akkor integrálás után adódik, hogy

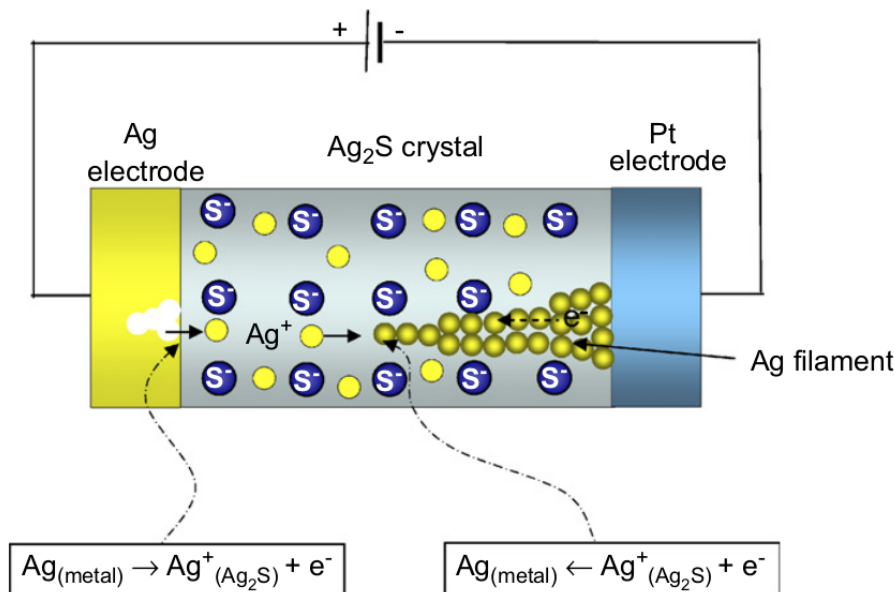
$$v(t) = M(q(t))i(t). \quad (3)$$

Ha a töltés és a fluxus közti kapcsolat a fluxustól függ: $di = W(\Phi)d\Phi$, integrálva

$$i(t) = W(\Phi(t))v(t). \quad (4)$$

Mindkét esetben az adott elem ellenállása vagy vezetőképessége a rajta átfolyt áram, vagy a rajta eső feszültség idő szerinti integráljától függ. Tehát egy adott pillanatbeli viselkedését a teljes múltja meghatározza, azaz memóriával rendelkezik. Egy ilyen áramköri elem feszültség-áram karakterisztikája szükségszerűen hiszterézist mutat. Ezért ez a modell alkalmas bipoláris ellenállás-változást mutató rendszerek leírására [6].

2.2. Az Ag_s rendszer tulajdonságai



2.1. ábra. Ezüst filamentumok kialakulása [7].

A következőkben egy memrisztív viselkedést mutató fizikai rendszert ismertetek, melyben egy ionos vezetőben lezajló elektrokémiai reakcióval érhető el bipoláris ellenállás-változás. A rendszer működését a 2.1. ábra alapján érthetjük meg. Egy elektrokémiaailag aktív és egy elektrokémiaailag inert elektróda közé szilárd elektrolit vékonyréteget helyezünk. Az ábrán bemutatott és a TDK munkám során vizsgált rendszerben Ag és Pt elektródákat, illetve Ag₂S ionos vezető réteget használunk. Az ezüst elektródára pozitív feszültséget helyezve abból ezüst ionok lépnek ki, melyek az elektromos tér hatására a Pt elektróda felé vándorolnak. A Pt elektródát elérve ott redukálódnak, és fémes ezüst réteget hoznak létre. Ha egy csúcsszerű lerakódás alakul ki a Pt elektródán, a további Ag ionok a csúcs felé fognak tartani, így végül egy fémes Ag nanoszerkezet kezd el nőni az Ag elektróda felé. Amikor ez a szerkezet eléri az Ag elektródát, drasztikus ellenálláscsökkenést tapasztalunk. Ellentétes polaritású feszültségnél a kialakult nanoszerkezet lebomlik, így a rendszer visszakapcsol nagy ellenállású állapotba.

Abban az esetben, ha kiinduláskor az elektrolit nem tartalmazza az aktív elektróda ionjait, az első csatorna kialakításához szükséges feszültség függ az elektrolit vastagságától (forming procedure). A következő kapcsolások során az elsőre kialakult csatorna mentén könnyen mozognak az ionok (easy transport channel), így a bekapcsoláshoz szükséges feszültség már független lesz az elektrolit vastagságától. Valamint a kristálytani hibák,

vakanciák mentén az aktív elektróda ionjainak mobilitása megnő [3].

Fontos kiemelni, hogy az Ag_2S elektrolitban nem termikus, hanem térvezérelt migráció zajlik le, így alacsony hőmérsékleten is megfigyelhető az effektus [8]. Továbbá a tömbi Ag_2S -től eltérően nanométeres elektrolitban fémes állapotok közti kapcsolás alakul ki, ami gyors kapcsolást tesz lehetővé. Ezt Andreev-reflexiók kísérletekkel igazolták [5], ugyanis tisztán az ellenállás méréséből nem derül ki, hogy egy kicsi, de jól vezető, vagy egy nagy, de gyengén vezető kontaktust vizsgálunk.

Amennyiben az inert elektróda és az Ag_2S vékonyréteg között atomi méretű kontaktus alakul ki, a kapcsolás iránya nem jól definiált, mivel ebben az esetben atomi átrendeződésekről és nem elektrokémiai fémesedésről van szó. Azonban már néhány nanométeres kontaktus esetén a kapcsolás reprodukál, iránya jól definiált. Ilyen kis mérettartományban ballisztikus vezetésről beszélhetünk, a kontaktuson áthaladó töltések az elektródákban termalizálódnak, így a Joule-hő nem ott disszipálódik, ahol a feszültség esik [9].

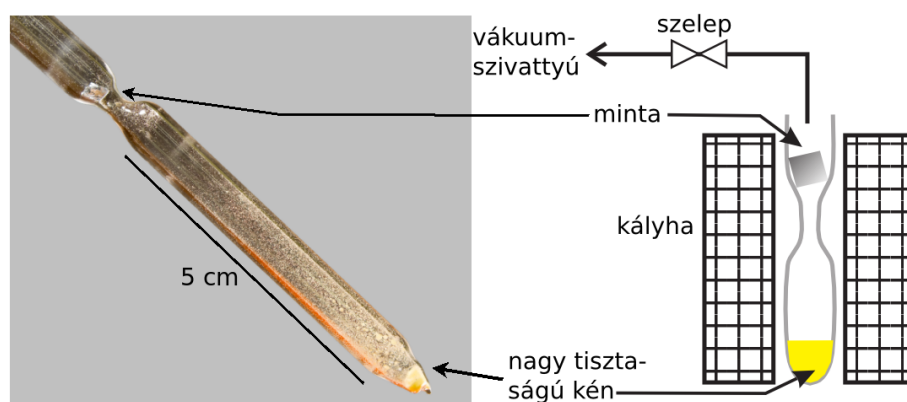
Az elektrokémiai fémesedéssel járó folyamatok vizsgálata során a leggyakrabban használt aktív elektródák az Ag és a Cu, míg inert elektródaként Pt, Ir vagy W szolgál. Elektrolit lehet például Ag_2S , Cu_2S [10], WO_3 [11] vagy SiO_2 [12].

Az elektrokémiai fémesedésen túl a vegyértékállapot-változással járó folyamatok is memrisztív viselkedést mutatnak. Az utóbbi elsősorban az átmeneti fémek oxidjai esetében figyelhető meg. Az oxid ionok migrációja miatt (amit általában az oxigén vakanciák mozgásával írnak le) a megfelelő fémek oxidációs állapota változik, ami a fémes alrács vezetőképességét befolyásolja. Ezzel a jelenséggel magyarázzák meg például a tantál-oxid [13] és a titán-oxid [6] vékonyrétegekben zajló kapcsolásokat.

A vegyértékállapot-változással járó rendszerek esetén több elektroliton is 100 ns alatti kapcsolásokat valósítottak meg (pl. Ta_2O_5 [13]), ezzel ellentétben az Ag_2S rendszerben a kapcsolás dinamikája még nem ilyen jól ismert. Munkám során ennek a dinamikának a tanulmányozása a feladatom. Arra a kérdésre keresem a választ, hogy rövid és hosszú időskálákon hogy zajlik a kapcsolás, milyen relaxáció figyelhető meg a rendszerben.

3. A minták előállítása

Munkám során Ag_2S mintákat vizsgáltam, melyekhez az ezüst vékonyrétegek a Magyar Tudományos Akadémia Wigner Fizikai Kutatóközpontjában készültek. Szilícium hordozóra vákuumpárolgatással $800 \text{ \AA}$ nominális rétegvastagságú ezüstöt párologtattak. A mintákat N_2 gázzal töltött fóliákba csomagolva szállították a BME Fizika Tanszék Szilárdtestfizikai Laboratóriumába, hogy a felület szennyeződését megakadályozzák. A minták készítésének az alábbiakban ismertetett módszere megegyezik Geresdi Attila doktori értekezésében [5] leírtakkal. A dolgozatban közölt méréseket az általam kénezett mintákon végeztem.



3.1. ábra. A mintakészítésnél használt eszközök.

A minták kénezéséhez és a mérések elvégzéséhez az ezüst vékonyrétegeket fel kellett darabolnom. Egy erre a célra kialakított gyémánt hegyű pálcával egyenes vonalban határozottan megkarcoltam a mintákat. A hordozó kis nyomás hatására a karcolás mentén tört. A karcolás során figyelembe kellett vennem, hogy a szilícium kristálytani irányok mentén sokkal könnyebben törik.

A mintadarabokat a feldarabolás után a 3.1. ábrán látható elrendezésben egy erre a célra kialakított kémcsőbe helyeztem. A csövet a következőképpen alakítottam ki: az aljához képest kb. 4 cm magasságban megolvasztva a csövön egy szűkület keletkezett. Ezután a kémcső aljára 99%-os tisztaságú kénport töltve és megolvasztva a kén homogenizálódott. A kémcsőbe helyezett minták a szűkületben, a kénréteg fölött néhány centiméterrel megakadtak. A csövet vákuumszivattyú segítségével 10^{-5} mbar nyomásig leszívva, majd egy szeleppel lezárva 2-10 perces időtartamokra 60°C hőmérsékletű kályhába helyeztem. Ezáltal a mintákon különböző vastagságú kénrétegek keletkeztek. Korábban az ezzel az eljárással készült mintákat RBS (Rutherford Back Scattering) vizsgálatoknak vetették alá, a memrezisztív tulajdonságokat mutató mintákon 10-30 nm

rétegvastagságú Ag_2S alakult ki [8]. A melegítés során a kémcső lezárása azért volt fontos, hogy a szivattyúba ne kerülhessen kéntartalmú szennyeződés.

Mind az ezüst vékonyrétegek, mind a kénezett minták felületére nagyon könnyen kötődnek szennyezők, így csak rövid ideig lehetnek levegőn és tárolásuk speciális környezetet igényel. Ezért a fel nem használt ezüst vékonyrétegeket 10 mm átmérőjű kémcsőbe helyeztem, majd azt egy turbomolekuláris szivattyú segítségével levákuumoztam, végül az üveget felolvasztva lezártam a csövet. Ez a módszer hosszútávú tárolásra alkalmas, a méréseknél használt kénezett mintákat dryboxban tároltam. A box a légköri nyomáshoz képest néhány mbar túlnyomású argon gáz atmoszférát biztosít.

4. Szobahőmérsékletű pontkontaktus mérőrendszer fejlesztése

4.1. A mérőrendszerrel szembeni elvárások

A BME Fizika Tanszékének nanokontaktusok laboratóriumaiban eddig csak alacsony hőmérsékleti mérésekre tervezett mérőrendszerrel lehetett memrisztív kapcsolási jelenségeket vizsgálni. TDK munkám célja szobahőmérsékletű, nagy időfelbontású mérésekre alkalmas mérőrendszer fejlesztése.

A mérési elrendezés alapja az, hogy a minta egy szélső pontját aranyszál segítségével kontaktálva, majd egy másik ponton egy hegyes tűt hozzáérintve az ezüstsulfid vékonyrétegben kialakuló kapcsolási jelenségek vizsgálhatók. Ehhez nagy stabilitású kontaktusokat kell létrehozni a vizsgálandó minta és a tű között. Így nagyon fontos a mechanikai rezgések csillapítása, vagy olyan rendszer építése, ami ezeket csak nagyon kis mértékben veszi át. További instabilitást okoz, hogy a külső hőmérséklet ingadozása miatt bekövetkező hőtágulás befolyásolja a minta és a tű távolságát.

A minták érzékenysége miatt a méréseket vákuumban vagy inert védőgázban kell végezni. Valamint a rendszert úgy kell kialakítani, hogy a tű és a minta cseréje a lehető legrövidebb idő alatt megoldható legyen.

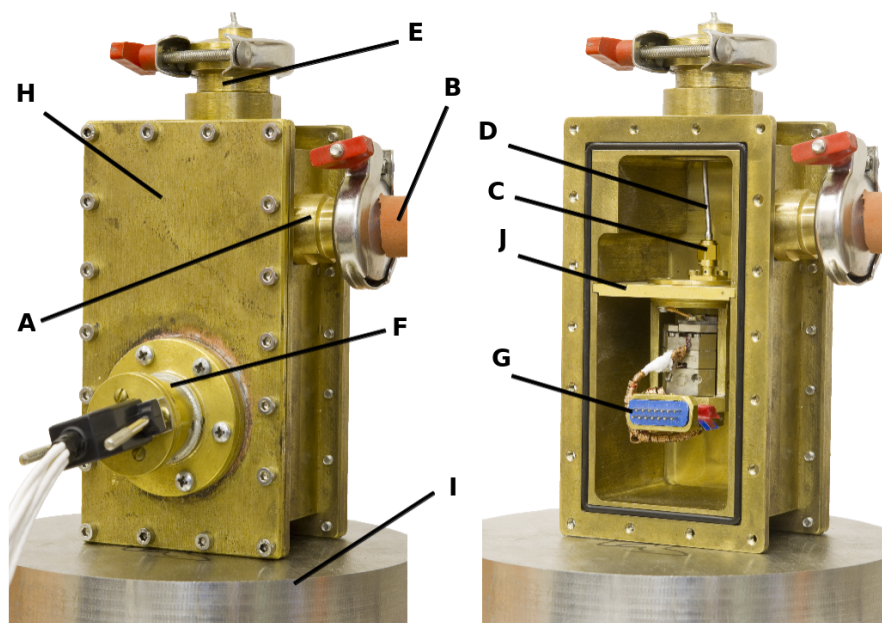
A kapcsolások gyors dinamikájának vizsgálata esetén fontos szempont, hogy az alkalmazott kábelek hossza és kapacitása a lehető legkisebb legyen.

A minta és a tű közötti távolság szabályozása a korábbi mérések során egy léptetőmotor és piezoelektromos mozgatók együttes alkalmazásával történt. Azonban a tisztán piezoelektromos mozgatás sokkal egyszerűbb, kompaktabb és pontosabb távolságszabályozást tesz lehetővé.

A mérések vezérlése számítógépes programmal történik. A programmal szemben támasztott alapvető követelmény a piezoelektromos mozgatók vezérlése és a kontaktusok automatizált létrehozása. Továbbá feszültség-áram karakterisztikák mérésakor a program vezérli a mérőkártyát, így a kártya meghatározott feszültségértékek ad ki és méri az áramot. Nagy sebességű mérések esetén pedig az oszcilloszkóppal felvett görbéket olvassa be és menti el.

4.2. A mintatartó felépítése

Az előző alfejezetben ismertetett elvárások alapján az általam tervezett mintatartó a 4.1. ábrán látható. A külső vákuumkamra sárgarézből készült, amelynek robusztus felépítése



4.1. ábra. A mintatartó zárt és nyitott állapotban.

miatt a mintatér hőmérséklete a külső hőingadozásokra lassan reagál. Három kivezetése közül az ábrán A-val jelölt csomagra köthető a szivattyú, és itt lehet a mintatér tetszőleges inert gázzal is feltölteni. A méréseket alacsony nyomáson végeztem, folyamatosan üzemeltetve a rotációs szivattyút. A mechanikai rezgések csökkentése miatt a szivattyú másik szobában kapott helyet, és egy hosszú gumicsővel (B) csatlakozott az A kivezetésre.

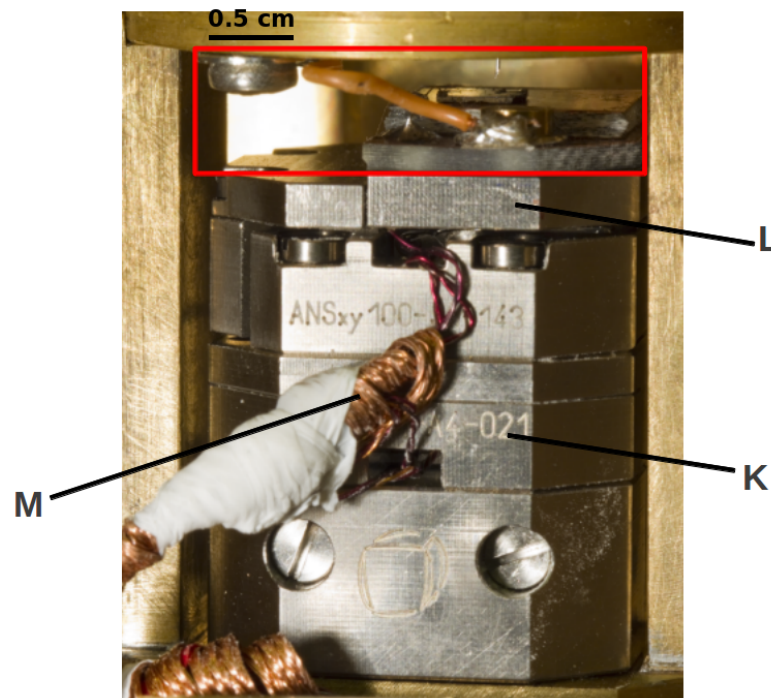
A minta és a tű között haladó jel SMA csatlakozón (C) keresztül semirigid koaxiális kábelben (D) át halad kapcsolástól függően vagy az áram/feszültség átalakító, vagy az oszcilloszkóp felé az E kivezetésen keresztül. A semirigid kábelre és az SMA csatlakozóra a zajszint csökkentése és a nagyfrekvenciás jelek torzulásának megakadályozása miatt van szükség.

Az F jelű csatlakozón keresztül a piezo mozgatók vezérlőjelei haladnak. Összesen tizenegy vezeték vákuumbiztos átvezetésére volt szükség, ezt tizenöt tűs soros csatlakozókkal oldottam meg. A kivezetés mintatér felőli oldalán lévő csatlakozó a 4.1. ábrán G-vel jelölt csatlakozójára pontosan illeszkedik, ha a fedlapot (H) rácsavarozzuk a rendszerre. A vezetékek egy szintén sárgarézből készült, stycast kétkomponensű ragasztóval töltött vákuumtömör kivezetésen keresztül egy újabb tizenöt pinos csatlakozóban végződnek.

A mérések során a mechanikai rezgések csillapítása érdekében először rugalmas kötelekre függesztettem a mintatartót. Ennél a módszernél azonban sokkal jobbnak bizonyult az, hogy egy stabil asztalra robusztus fémhengert (I) helyeztem, ami a tehetetlensége mi-

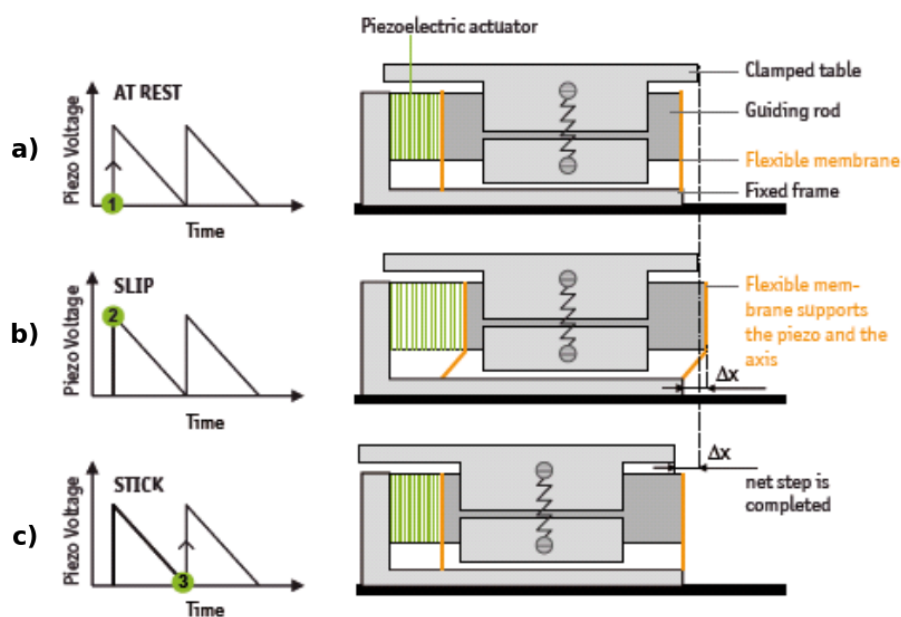
att csak kis mértékben képes felvenni mechanikai rezgéseket. Erre a hengerre helyeztem a mintatartót.

A mérőrendszer felépítése moduláris, a mintát, a tűt és a piezo mozgatókat tartalmazó modul (J) a mintatérből kiemelhető. Ezáltal a tű és a minta cseréje gyorsan és kényelmesen megvalósítható. Ennek a modulnak a kinagyított képe látható a 4.2. ábrán.



4.2. ábra. A piezoelektromos mozgatók.

A mérés során a tű végig rögzített, a kontaktusok létrehozása a minta helyzetének változtatásával történik. A teljes pozicionálást két piezoelektromos mozgató végzi, ezek egymás tetején helyezkednek el. Az alsó egy ún. inerciális piezo (K), amivel függőleges irányban (z irány) maximum 5 mm elmozdulás érhető el, ennek módját a 4.3. ábra szemlélteti. Maga a piezokristály ilyen elmozdulásra nem képes, azonban egy lassan növekvő feszültség hatására a kristály kitolja a mozgató felső lapját (4.3. c)), majd hirtelen levéve a feszültséget a felső lap tehetetlensége miatt fent marad, amíg a kristály összehúzódik (4.3. a) és b)). A kristály és a lap közti csatolást úgy oldották meg, hogyha ismét lassú felfutású feszültséget kapcsolunk a kristályra, akkor a felső lap is tovább csúszik felfelé. Ezáltal egy aszimmetrikus fűrészfogjellel nagy elmozdulások érhetőek el. Az inerciális piezo optimális vezérlése 1kHz frekvenciájú és 20 V amplitúdójú fűrészfogjel, azonban rövid ideig ennél nagyobb frekvenciával és amplitúdóval is meghajtható. Negatív feszültséget azonban tilos rákapcsolni.

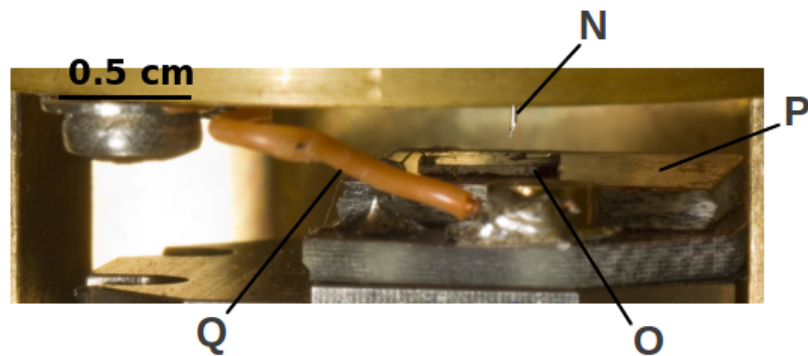


4.3. ábra. Az inerciális piezo mozgása. A kép a gyártó honlapjáról származik [14].

Az inerciális piezo vízszintes irányú (x-y sík) elmozdulásra nem képes, ezt a tetejére szerelt kisebb maximális elmozdulású, 3D piezo (L) végzi. Ez a piezo egység képes mozogni a tér mindhárom irányában, az x-y irányú mozgató mellett a kontaktusok kontrollált létrehozásában is fontos szerepet játszik. A tű és a minta közelítése során z irányban maximális a kitérése, majd amint a tű és a minta kontaktusba került, az alsó piezo mozgása megáll, a felső pedig visszahúzódik, így utóbbit finoman közelítve a minta felé akár néhány atomos kontaktus is létrehozható. Az ezzel a módszerrel létrehozott kontaktusok stabilitása nagy, így alkalmasak az ellenállás-változások rövid- és hosszútávú vizsgálatára is. A 3D piezo x és y irányban szobahőmérsékleten maximum 120 V feszültség hatására 40 μm elmozdulásra képes, z irányban 60 V feszültség hatására 4.3 μm -t mozog.

A 4.2. ábrán látszik, hogy a piezo mozgatók vezérlésére szolgáló kábelek rézdróttal vannak körbetekerve (M). Mivel a mozgatók vezérlése nagy feszültséggel történik, a mérés során ezek árnyékolására szükség van. Főként a minta és a tű közelítésekor nagyon fontos az, hogy a lehető legkisebb szintre szoruljon az elektromos zaj.

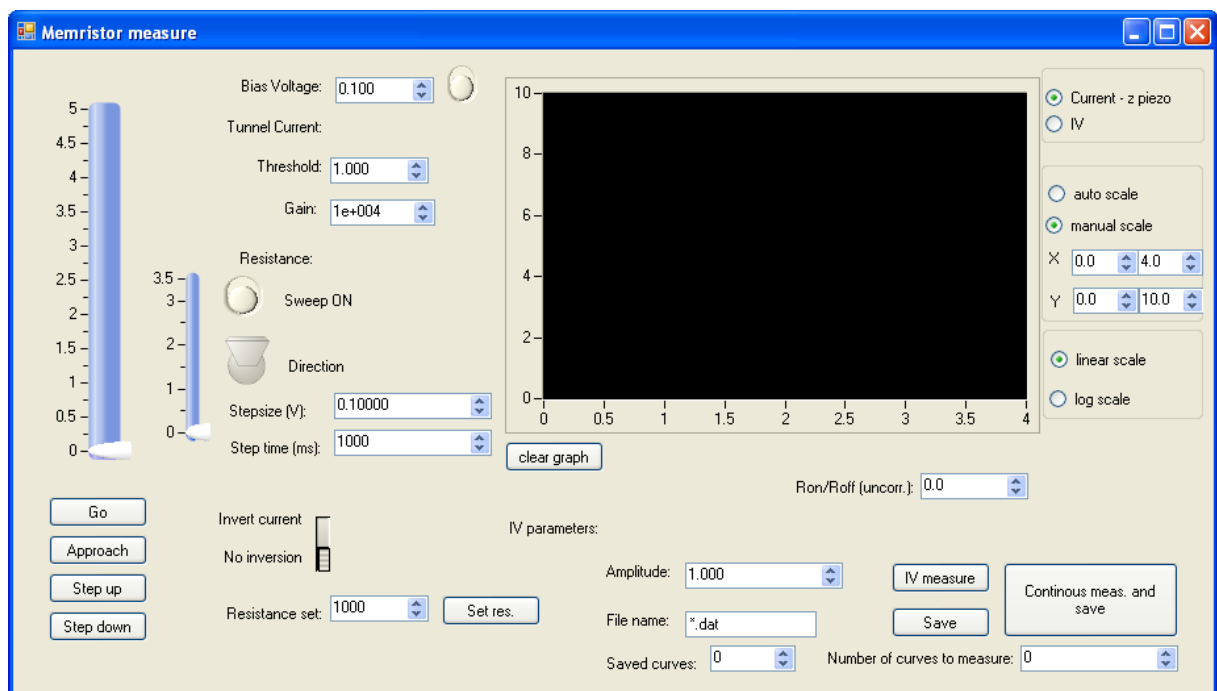
A minta és a tű elhelyezkedését, azaz a 4.2. ábrán piros kerettel kiemelt területet mutatja kinagyítva a 4.4. ábra. A tű (N) a háztól elektromosan elszigetelve erősíthető a mintatartóhoz úgy, hogy a semirigid kábel belső érével fémes kontaktusba kerüljön. A minta (O) egy réz borítású lapra (P) van felragasztva, amellyel egy ezüstpasztával a mintához ragasztott 0.1 mm átmérőjű aranyzál fémesen köti össze. Ez a lapka egy rézvezeték (Q) segítségével a mintatartó házhoz csatlakozik. A semirigid kábel külső



4.4. ábra. A minta és a tű elhelyezkedése

borítása is érintkezik a házzal, így az áramkör a minta és a tű összeérintésével záródik. A mérések során Pt80/Ir20 összetételű, 0,25 mm átmérőjű tűt használtam, amit egy olló segítségével ferdén vágva hegyeztem.

4.3. A mérésvezérlő program



4.5. ábra. A mérésvezérlő program kezelőfelülete.

A mérések vezérlését és az adatgyűjtés egy részét National Instruments X-6363 típusú mérőkártyával végeztem. Ehhez szükség volt egy mérésvezérlő program írására, amit C# nyelven valósítottam meg. Az elkészült program kezelőfelülete látható a 4.5. ábrán.

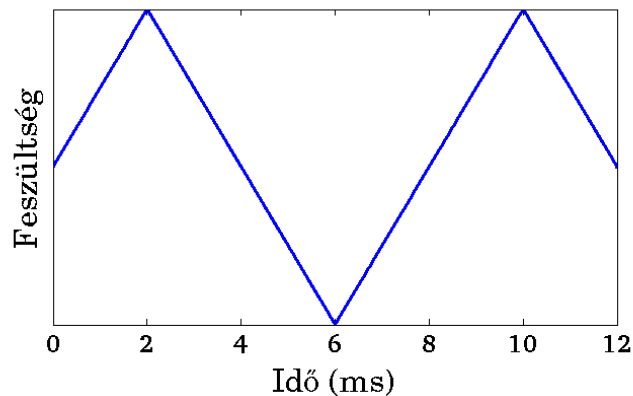
A *Bias voltage* mezőben beállíthatjuk, hogy mekkora feszültséget kapcsoljon a program a minta és a tű közé. Az áramerősítő által mért feszültség a *Tunnel current* mezőben jelenik meg. A *Gain* ablakban megadhatjuk az áramerősítő erősítését, amiből a program kiszámolja a kontaktus ellenállását.

A minta tűhöz való közelítésének egy részét az a Magyarkuti András által készített programrészlet képezi, amit több funkcióval is kiegészítettem. András programrészlete egy gombra kattintás hatására aszimmetrikus háromszögjelet ad az inerciális piezora és z irányban maximálisan kitéríti a 3D piezot. Majd ha az áramerősítő kimenete egy állítható triggerszintet elér, a közelítés megáll és a 3D piezo visszahúzódik. Ezt az algoritmust bővítettem a következőkben ismertetett funkciókkal.

A közelítés során a 3D piezo függőleges irányban végkitérésben van, ami $4.3\ \mu\text{m}$ -t jelent. Az inerciális piezo addig közelíti a mintát a tűhöz, amíg a köztük folyó alagútáram egy előre beállított küszöbszintet elér. Ez a szint a *Threshold* mezőben adható meg. Amint az inerciális piezo megáll, a 3D piezo is visszahúzódik, ezáltal elkerülhető, hogy a tű túl mélyen fúródjon a mintába. Ezt követően a 3D piezo fokozatos kitolásával létrehozható a kontaktus. Ez több módon is történhet, a bal oldalon látható kisebb csúszka mozgatásával, vagy a *Set res.* gombra való kattintással. A második esetben a program az általunk definiált lépésközzel lépteti felfelé a mozgatót, egészen addig, amíg az előre beállított ellenállásértéket, vagy annál kisebbet nem mér. Ezen paramétereket a *Stepsize*, *Steptime* és a *Resistance set* mezőkben lehet beállítani. Ha a 3D piezoval mégsem érhető el a tű, akkor a *Step up* gombra kattintva az inerciális mozgató kissé elmozdul felfelé, valamint ha túlzottan közel lenne egymáshoz a tű és a minta, akkor a *Step down* gombbal lefelé léphetünk. Tetszőleges pont eléréséhez a bal oldali széles csúszkát a kívánt kitérésre állítva a *Go* gomb megnyomásával automatikusan ebbe az állásba hozható az inerciális piezo.

Lehetőség van a 3D piezo folyamatos fel vagy lefelé mozgatására is, ilyenkor a *Sweep ON* kapcsolót kell bekapcsolni, és szintén a *Stepsize*, valamint a *Steptime* mezőkben állíthatjuk a lépések nagyságát és a két lépés közt eltelt időt. A mozgatás iránya a *Direction* kapcsolóval állítható.

Amint sikerült létrehozni egy megfelelő kontaktust, a kezelőfelület jobb oldali részén elhelyezett elemekkel feszültség-áram görbéket vehetünk fel. Ezen görbék felvétele során a 4.6. ábrán látható fűrészfogjelet adja ki a program, és ennek függvényében az áramerősítő kimenetén mérhető feszültséget ábrázolja. A feszültség-áram karakterisztika felvételéhez elég lenne a 4.6. ábrán látható jel 0-8 ms-ig tartó részét kiadni, azonban az első fél periódus ismétlődik. Ennek oka az, hogy az első fél periódus során



4.6. ábra. A program által kiadott fűrészfogjel. A feszültség 0 V-ról indul, amplitúdója a programban megadható.

kialakul egy kontaktus, aminek karakterisztikáját a 2-10 ms-ban kiadott jellel mérjük, majd visszatérünk a kezdeti állapotba. A kiadott jel amplitúdója 0 és 10 Volt között tetszőlegesen változtatható 3 tizedesjegy pontossáig (*Amplitude*).

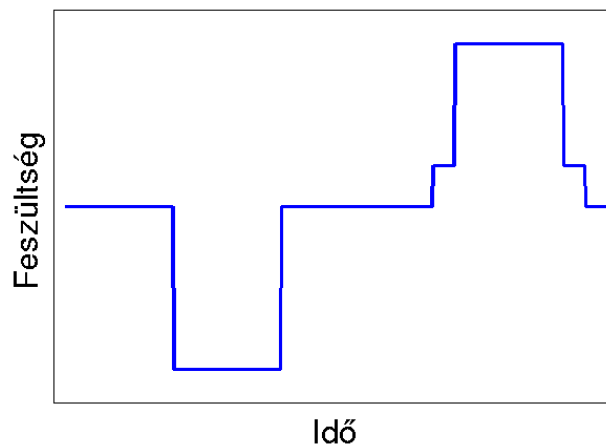
Az *IV measure* gomb megnyomásával egyedi görbéket lehet felvenni, és a mentés gombra kattintva az előre megadott néven elmenteni. Egymás után több görbe felvételére és folyamatos mentésre is lehetőség van, ilyenkor a *Number of curves to measure* mezőben állítható be a felvenni kívánt görbék száma. A folyamatos mérés és mentés gombra kattintva a görbéket a program egymás után leméri és külön adatfájlokba menti. A mentett görbék számát a *Saved curves* mező jelzi.

Az egyes görbék felfutó és lefutó ágaihoz tartozó ellenállások arányát az *Ron/Roff* ablak mutatja. A mérések gyors elvégzése miatt ezt az arányt nem egyenes illesztésével határozza meg a program, hanem két ugyanazon az alacsony feszültségnél mért pontot hasonlít össze. Természetesen ezt az arányt a görbék kiértékelésénél pontosan számítom.

A közelítés során az alagútáram a minta és a tű távolságával exponenciálisan változik, így ha a 3D piezo z irányú elmozdulásának függvényében ábrázoljuk az árammal arányos feszültségjelet, akkor szükség lehet logaritmikus skálára. Ezért a programban megadható, hogy lineáris vagy logaritmikus léptékű legyen-e a grafikon. Az ábrázolás során szintén állítható, hogy a tengelyek igazodjanak-e a mért jelek intervallumaihoz, vagy esetleg előre definiált részeket szeretnénk csak látni (*manual/auto scale*).

A fentiekben ismertetett program működése során a mérőkártya két analóg kimenetét, három analóg és egy digitális bemenetét, valamint 5 V-os kimenetét használja. A 3D piezo vezérlése az AO0 kimeneten keresztül egy feszültségvezérelhető Delta ES075-2 típusú tápegységgel valósul meg. Az inerciális piezo mozgatásához szükséges erősítő

meghajtása is Delta ES075-2 típusú tápegységekkel aszimmetrikusan -5 V és $+75\text{ V}$ feszültséggel történik. Az erősítőt a program által a mérésvezérlő kártya AO1 kimenetén kiadott feszültség vezérli. Az AO2 kimeneten jelenik meg az elleállítás monitorozásához szükséges feszültség, és a feszültség-áram karakterisztikák fűrészfog jele. Az inerciális pizeo pozíciójának beolvasása az AI1 csatornán történik, az ehhez szükséges 5 V feszültséget is a kártya egyik kimenete adja. Az AI0 csatornához az áramerősítő kimenete csatlakozik. A digitális bemenet a közelítés során használt triggerjel generálásához szükséges.



4.7. ábra. Példa a függvénygenerátorral kiadott jelalakokra.

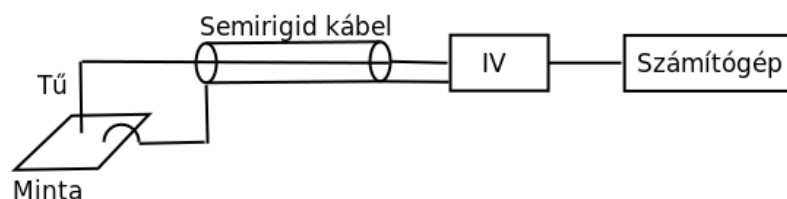
A mérések másik részében a feszültséget egy programozható függvénygenerátor (Agilent 81105A) segítségével adtam ki, a válaszjelet oszcilloszkóppal (LeCroy 9344C) mérve GPIB buszon keresztül olvastam be és mentettem ASCII típusú adatfájlokba. Az oszcilloszkóp képes sok egymás után felvett görbe analóg átlagolására minden csatornán. Egyes méréseknél ezt a funkciót is kihasználtam, ilyenkor az oszcilloszkóppal kommunikáló vezérlő program az oszcilloszkóp két csatornáján mért jel, valamint az átlagolt jelek beolvasását is elvégzi.

A függvénygenerátoron többféle jelalakot programoztam le, amelyek maximum 10 V amplitúdóval adhatók ki a vizsgálandó mintára. Ezek közül egy példa látható a 4.7. ábrán. Mivel mind a frekvencia, mind az amplitúdó állítható, a tengelyeken nem jelöltem skálát.

4.4. A mérőrendszer összeállítása

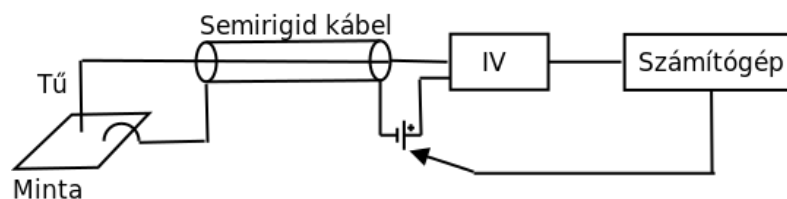
A közelítés során alkalmazott kapcsolás a 4.8. ábrán látható.

A kontaktus létrehozásakor fontos, hogy a tű és a minta ne nyomódjon össze, csak



4.8. ábra. A minta és a tű közelítéséhez használt mérési elrendezés.

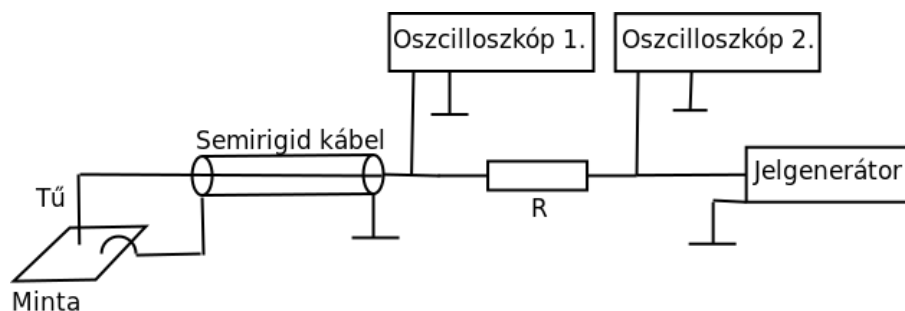
finoman érintkezzen, ezért az inerciális piezoval való közelítés már akkor leáll, amikor a minta és a tű még nem érintkezik, de már nagyon közel vannak egymáshoz és a rájuk kapcsolt feszültség hatására alagútáram folyik köztük. Ezért nagyon kis áramokat mérünk, a zajok szűrése miatt a koaxiális semirigid kábel közvetlenül az áramerősítő bemenetére csatlakozik. A ráadott gerjesztő feszültséget is az áramerősítő adja ki, ami ± 10 V között változtatható. A közelítés során ez az érték -0.120 V, az áramerősítő pedig 10^9 erősítésben működik.



4.9. ábra. I-V görbék méréséhez használt kísérleti összeállítás.

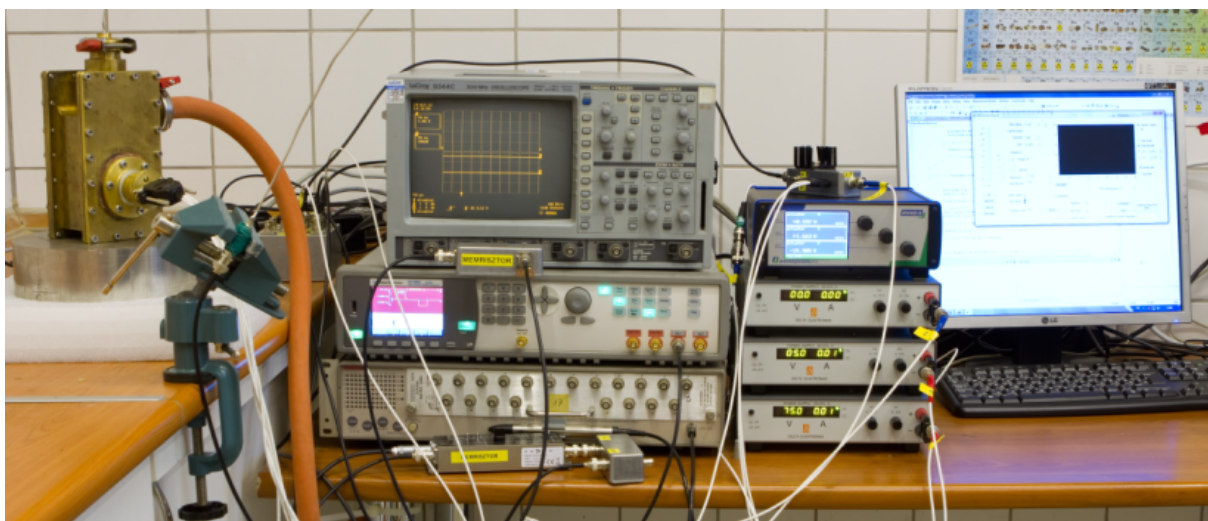
Az áram-feszültség karakterisztikák felvételekor alkalmazott mérési elrendezést mutatja a 4.9. ábra. A mérőkártya analóg outputja által kiadott feszültség jelenik meg a minta és az áramerősítő bemenete között, aminek bemeneti ellenállása $50\ \Omega$. A mintán folyó áram az áramerősítőn keresztül a mérőkártya analóg inputjára kerül, ahonnan a mérést vezérlő program beolvassa. Az ábráról látszik, hogy a vizsgált nanoszerkezet az $50\ \Omega$ bemeneti ellenállással sorosan van kapcsolva, amit a mért görbék kiértékelésénél figyelembe kell venni.

A kapcsolások dinamikájának vizsgálatakor gyors és alacsony zajú elektronikára van szükség, ezért a kontaktusok létrehozása után használt mérési elrendezést mutatja a 4.10. ábra. Az Ag_2S vékonyréteg ellenállásának változása esetén a feszültség-áram karakterisztikában megjelenik egy nagyon kicsi differenciális ellenállású tartomány, aminek vizsgálatára az áramgenerátoros meghajtás ideális. Így a minta ellenállásához képest sokkal nagyobb soros ellenállást (4.10. ábra R elem) kell alkalmazni. Egy kontaktus tipikusan kb. 50 és $200\ \Omega$ -os állapotok között kapcsol, ezért ideális esetben $1\ k\Omega$, vagy annál nagyobb soros ellenállásra lenne szükség. Azonban a jelgenerátor maximum 10 V



4.10. ábra. A függvénygenerátorral vezérelt és oszcilloszkóppal mért jelalakok felvétele

amplitúdójú jelek kiadására képes, és ahhoz, hogy a mintán megjelenjen a kapcsoláshoz szükséges küszöbfeszültség, a tisztán áramgenerátoros meghajtás nem lehetséges. A dolgozatban közölt mérések esetén $50\ \Omega$ vagy $330\ \Omega$ soros ellenállást használtam. Mindkettő kevert meghajtást eredményez, az első a feszültséggenerátoroshoz, a második az áramgenerátoroshoz áll közelebb.



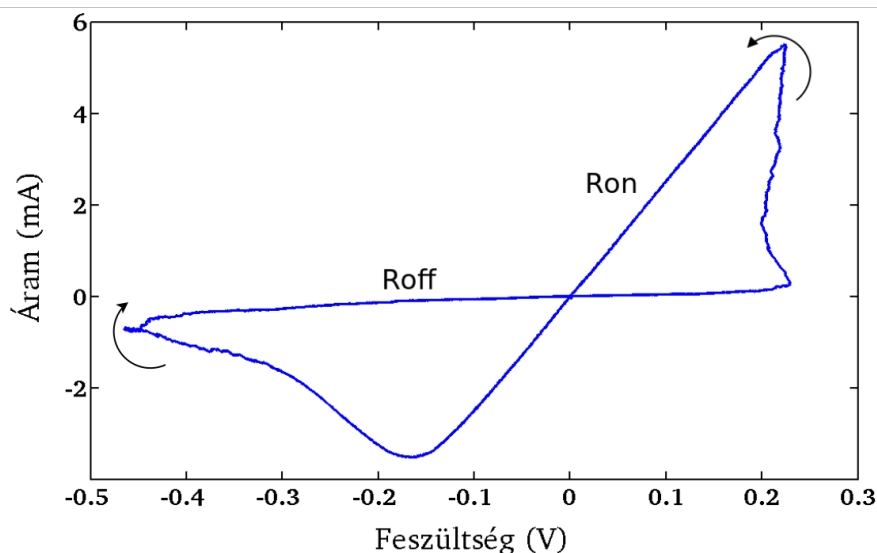
4.11. ábra. A mérések során használt műszerek.

A TDK munkám során hardveres és szoftveres szempontból egy teljes mérőrendszert készítettem, aminek mérési elrendezést mutatja a 4.11. ábra. A kép bal szélén a korábban már ismertett mintatartó helyezkedik el, balról jobbra haladva a jelgenerátor és az oszcilloszkóp, a piezomozgatók meghajtásához alkalmazott tápegységek és a mérések vezérlését valamint az adatgyűjtést végző számítógép láthatók.

5. Mérési eredmények és diszkusszió

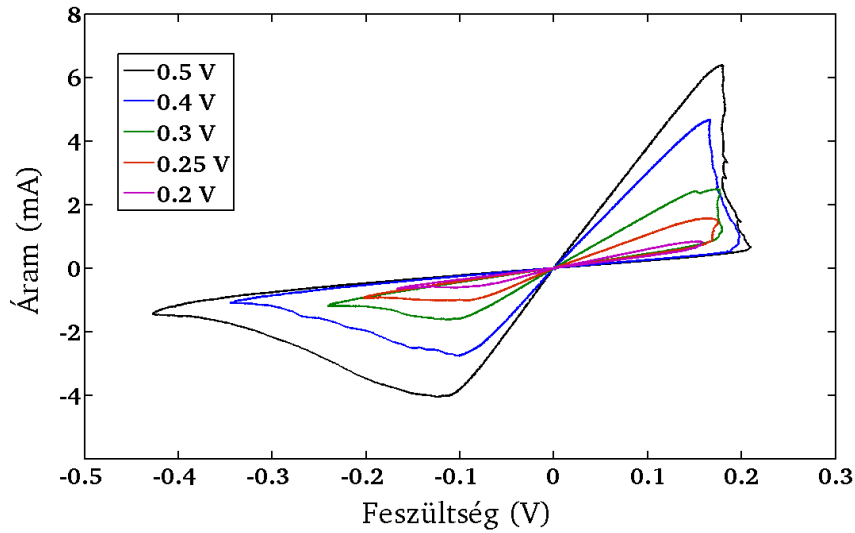
5.1. Feszültség-áram karakterisztikák

Az elkészült mérőrendszer tesztelése után először különböző mértékben kénezett minták feszültség-áram karakterisztikáit vizsgáltam. Azt tapasztaltam, hogy a létrejövő kontaktusok stabilitása nagyban függ a kénréteg vastagságától. Túlzottan vékony kénréteg esetén ha a tű egy kicsi mechanikai instabilitás miatt közelebb kerül a mintához, már a tiszta ezüst réteggel fémesen érintkezik és nem látható memrezisztív viselkedés. Nagyon vastag rétegek esetén pedig nem lesz igaz az, hogy fémes állapotok közti kapcsolás valósul meg. Ideális rétegvastagság 5 perces kénezés során alakult ki a mintákon, így az ebben a fejezetben bemutatott méréseket is egy 5 percig kénezett mintán végeztem. Ennél a mintánál az ezüstréteg vastagsága $800 \text{ \AA}$ volt, a korábbi mérések alapján a kén néhány tíz nm mélyen diffundált az ezüst rétegbe [8].



5.1. ábra. Egy tipikus feszültség-áram karakterisztika. Az off állapot $2.2 \text{ k}\Omega$ ellenállású, az on állapot $38 \text{ }\Omega$.

Az 5.1. ábrán ezen a mintán készült feszültség-áram karakterisztika látható, ami egy tipikus memristor viselkedést mutat. Ezt a mérést a 4.9. ábrán látható elrendezésben végeztem. Zérus feszültségből kiindulva, pozitív feszültségek felé haladva először lineáris az I-V görbe $R_{\text{off}} = 2.2 \text{ k}\Omega$ ellenállással. Ezután $V=0.2 \text{ V}$ küszöbfeszültségnél hirtelen megnő az áram, majd a feszültséget csökkentve ismét lineáris, de lényegesen kisebb ellenállású ($38 \text{ }\Omega$) I-V görbén haladunk az origó felé. Megfelelően nagy negatív küszöbfeszültségnél a rendszer visszakapcsol az R_{off} állapotba. Jól látszik, hogy ele-



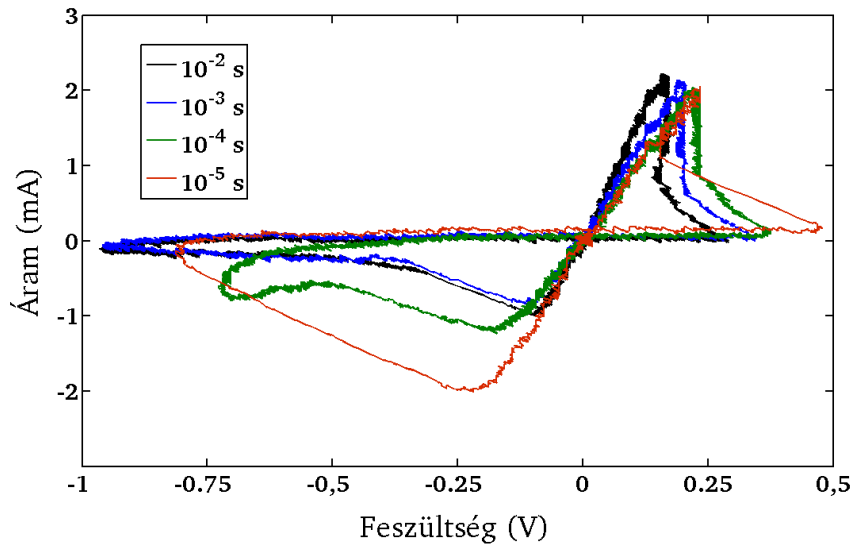
5.2. ábra. Az I-V karakterisztika függése a gerjesztő fűrészfog feszültség amplitúdójától. A görbék amplitúdója időben folyamatosan csökkenő.

gondően nagy pozitív illetve negatív feszültséggel a rendszer R_{off} illetve R_{on} állapota beállítható, majd alacsony feszültségnél kiolvasható, hogy a kontaktus melyik állapotban van, azaz egy ilyen rendszer kiválóan alkalmazható memóriaként.

A kapcsolásnak megfelelő feszültségnél ideális esetben zérus a differenciális ellenállás, az ideális I-V karakterisztika ezen szakasza függőleges. Azonban ez csak tökéletes áramgenerátoros üzemmódban mutatható ki, az alkalmazott kevert meghajtás esetén az említett szakasz enyhén visszahajlik.

Az 5.2. ábrán látható mérésben a mérőkártyáról kiadott fűrészfogjel amplitúdója folyamatosan csökkent. Megfigyelhető, hogy ezzel együtt az $\frac{R_{off}}{R_{on}}$ arány is folyamatosan csökken, azaz egyre kisebb mértékben kapcsol a rendszer. Ha a kiadott jel amplitúdóját állandó értéken tartjuk és a frekvenciáját változtatjuk, az tapasztalható, hogy növekvő frekvenciák felé haladva egyre nagyobb feszültségnél megy végbe ellenállás-változás (5.3. ábra). A soros ellenállást, a szórt kapacitásokat és a rendszerben használt elektronikát ismerve tudjuk, hogy ez az effektus biztosan nem ezeknek tulajdonítható. Azon túl, hogy a nanométeres Ag_2S rendszer nemlineáris viselkedést mutat, ellenállás-változása időfüggő folyamat. Ellenállásának értéke függ a rajta korábban átfolyt töltés mennyiségétől, ezáltal egyfajta memóriával rendelkezik. Ezt az időfüggést feszültségpulzusok segítségével vizsgáltam, a mérések eredményeit a következő alfejezetek tartalmazzák.

Az 5.3. ábrán látható és a következő alfejezetekben ismertetett mérések már a 4.10. ábrán feltüntetett elrendezésben készültek.



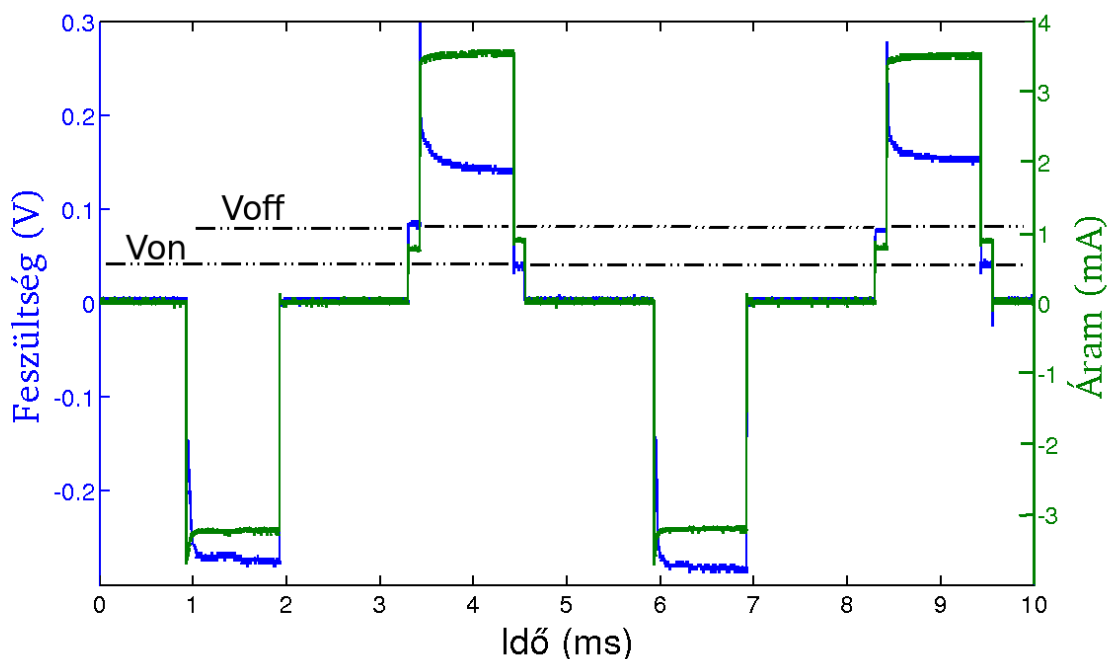
5.3. ábra. I-V karakterisztikák különböző periódusidejű gerjesztő jelek esetén.

5.2. A kapcsolás vizsgálata feszültségimpulzusok segítségével

Az 5.3. ábrán már látszik, hogy a kapcsolás folyamata érzékeny a meghajtó jel sebességére. A továbbiakban a kapcsolás dinamikáját vizsgálom az Agilent függvénygenerátorral kiadott feszültségpulzusok segítségével.

Az impulzusokkal történő mérés elvét az 5.4. ábra szemlélteti. A kontaktus két állapotának ellenállása: $R_{\text{off}} = 110\Omega$, $R_{\text{on}} = 41\Omega$, az alkalmazott soros ellenállás 330Ω , tehát kevert meghajtásban zajlik a folyamat. Az első nagy negatív impulzus kondicionálásra szolgál. Az ezt követő pozitív pulzus három részből áll: az első néhány tized ms-ban egy a kapcsolást kiváltó küszöbfeszültségnél alacsonyabb feszültséget kapcsolunk a mintára, hogy megmérjük a kiinduló ellenállást. Majd egy 1 ms széles, a küszöb feletti impulzus hatására létrejön a kapcsolás. Ezután ismét a küszöbnél alacsonyabb jellel mérjük az ellenállást. A mintán eső feszültség és a rajta átfolyó áram időbeni változásából kitűnik, hogy egy pulzus alatt az áram keveset változik, míg a feszültségben jelentős változás figyelhető meg. Ebből következően ez a meghajtás közel áll az áramgenerátoros meghajtáshoz, a rendszer relaxációja elsősorban a feszültségjelben jelenik meg.

Nagy negatív impulzus hatására a rendszer ismét *off* állapotba kerül, ahogy az a következő mérőfeszültségnél látszik. Ismét pozitív impulzust adva a mintára a kapcsolás reprodukál. A továbbiakban a kondicionáló negatív impulzust nem fogom feltüntetni, ugyanis alapvetően a nagy ellenállásúból kis ellenállású állapotba történő kapcsolás jelenségét vizsgáltam és az időfelbontás optimalizálása érdekében csak a pozitív pulzusra adott válaszokat mértem. Természetesen minden kapcsolás előtt negatív impulzussal kon-



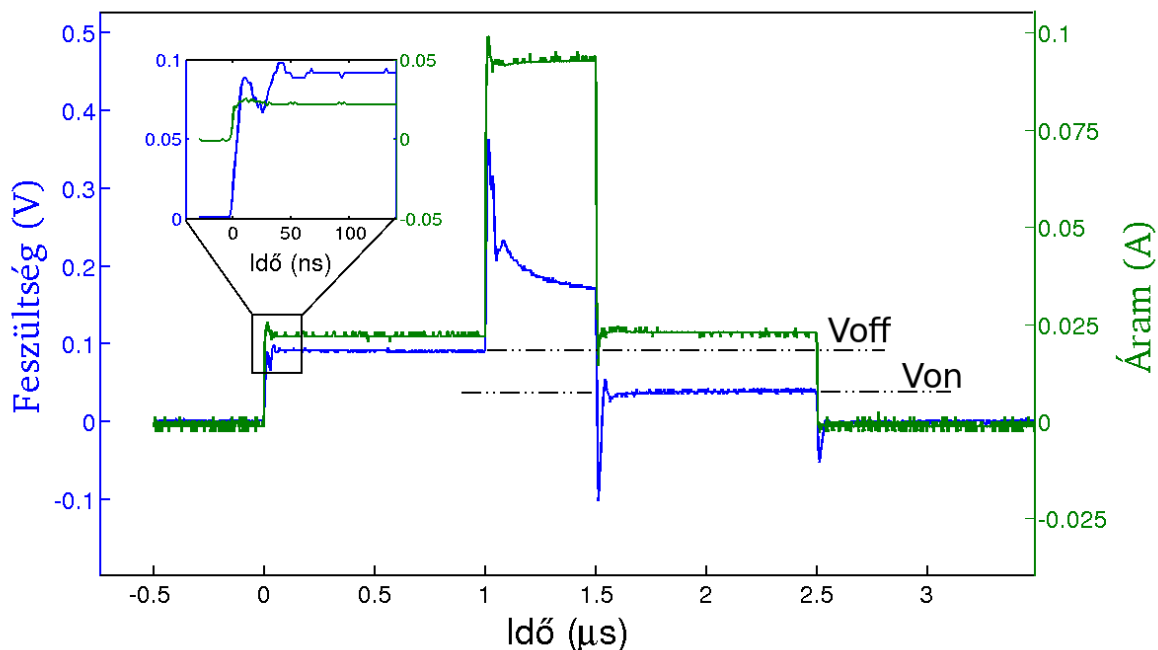
5.4. ábra. Ismételt kapcsolás áramimpulzusokkal. Szaggatott vonalak jelölik a két állapotnak megfelelő ellenálláson eső feszültségek értékeit.

dicionáltam a mintát.

Az 5.4. ábrán látható impulzussorozat jól szemlélteti a kapcsolások reprodukálhatóságát. A nagy amplitúdójú impulzusra adott válaszban 1 ms-os skálán relaxációt látunk, a továbbiakban vizsgáljuk meg rövidebb időskálán is a relaxáció folyamatát. A válasz detektálására használt oszcilloszkóp mintavételi sebessége 500 Msample/s, azaz két adatpont felvétele között 2 ns telik el, így rövid időskálán is vizsgálható a kapcsolat.

500 ns hosszú impulzus hatására végbemenő változás látható az 5.5. ábrán. A kapcsolat előtti és utáni ellenállások aránya 2,29, ezzel összhangban az 500 ns-os pulzus során végbemenő relaxáció alatt a mintán eső feszültség eredeti értékének kevesebb, mint felére esik vissza.

A kiindulási ellenállás mérésére szolgáló impulzus során nem történik változás a rendszerben, a válaszban egyszerű lépcsőfüggvényt várnánk, azonban oszcilláció figyelhető meg a jelalakokban. Ilyen rövid időtartományban már instrumentális oszcillációk, túllövések jelennek meg a detektált jelben, amit impedancia-illesztéssel lehetne kiküszöbölni. A további mérések során erre is fokozott figyelmet kell majd fordítani. Ez az oszcilláció körülbelül 50 ns-ig tart, ennél jobb felbontásban nem tudjuk vizsgálni a folyamatot, azonban a küszöbfeszültséget meghaladó impulzus hatására ezen a skálán is számottevő ellenállás-változást mutat a rendszer, azaz feltételezhető, hogy a létrehozott kontaktusok



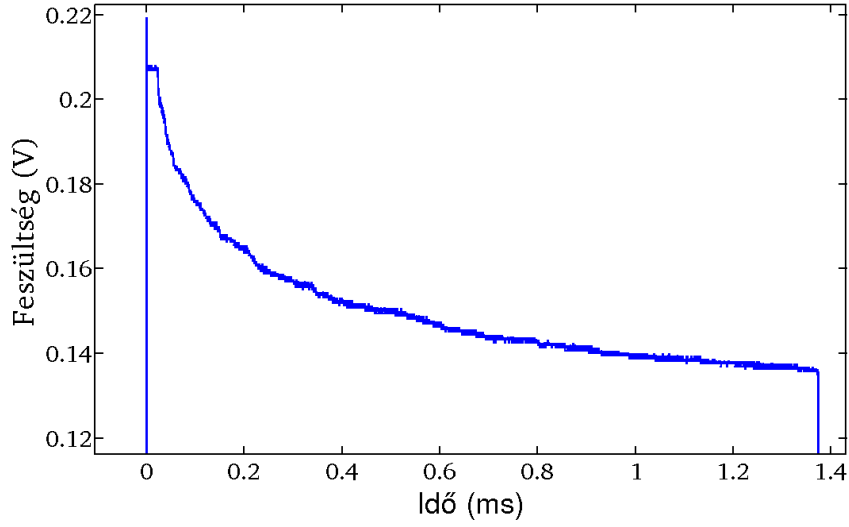
5.5. ábra. Rövid impulzus hatására végbemenő változás, 10 egymás utáni kapcsolás átlaga.

akár az 50 ns-os instrumentális limitnél gyorsabb kapcsolásra is képesek. Amennyiben a rendszer exponenciális ütemben relaxál, ebből a mérésből arra következtethetünk, hogy a relaxáció időállandója 50 ns körüli. 1 ms alatt 20 000-szer több idő telik el, ilyen időskálán exponenciális relaxáció esetén már nem szabadna látnunk változást. Ezzel ellentétben az 5.6. ábrán egy vízszintes vonal helyett jelentős relaxáció figyelhető meg, tehát nem exponenciális folyamattal van dolgunk.

5.3. A relaxáció jellegének vizsgálata

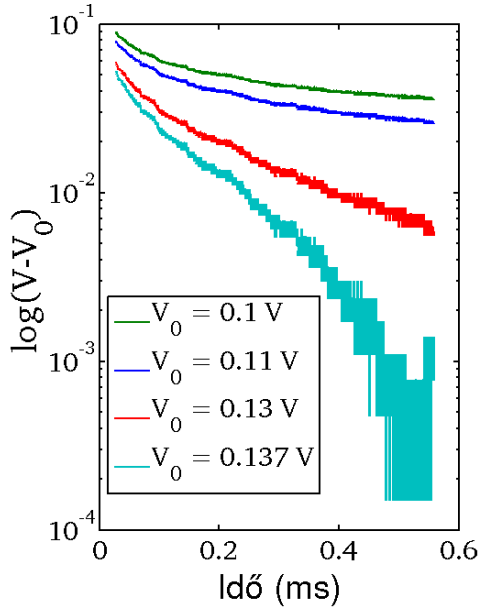
A fentiekben ismertetett mérésekben 50 ns-os és 1 ms-os időskálákon is látható relaxáció, ami arra utal, hogy nincs egyetlen jól meghatározott időállandó a rendszerben. A továbbiakban a relaxáció jellegét vizsgálom az impulzusokra adott válasz időfüggésének részletes analízisével.

A mérések folyamata a következő: minden esetben egy 100 ms hosszúságú negatív kondicionáló impulzus után egy 50 ms-os várakozás következett. A hosszú idejű negatív impulzus szerepe az, hogy minden mérés esetén ugyan abból a jól definiált kezdőállapotból induljunk. Majd alacsony árammal mértem a kikapcsolt állapot ellenállását, amit követően 1 ms szélességű impulzussal *on* állapotba kapcsoltam a mintát. Ezután ismét az alacsony



5.6. ábra. A relaxáció időfüggése.

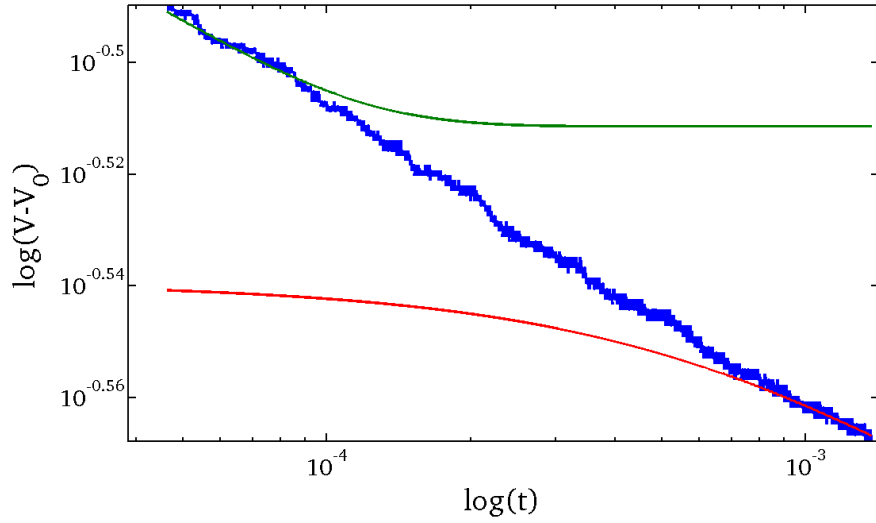
áramú ellenállásmérés következett. Az 5.6 – 5.9. ábrákon csak a kapcsolást kiváltó impulzus alatti feszültség-idő függést tüntettem fel. $330\ \Omega$ soros ellenállás biztosította a közel áramgenerátoros meghajtást.



5.7. ábra. A relaxáció időfüggése.

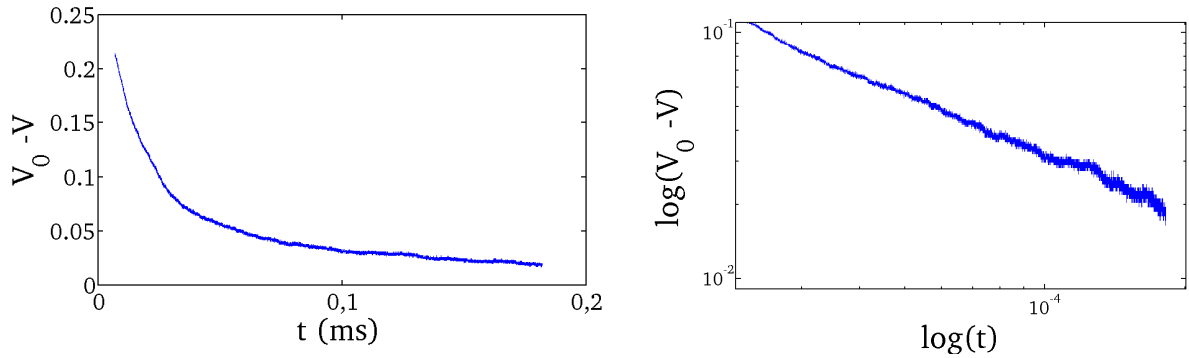
Az 5.6. ábrán 1 ms alatti relaxáció látható, ez egy reprezentatív egyedi görbe, amit a továbbiakban vizsgálók. Exponenciális relaxáció esetén a $\log(V - V_0) - t$ grafikont ábrázolva egyenest kapnánk. Itt V_0 egy illesztési paraméter, az a feszültség, ahova a rendszer végtelen idő alatt relaxálna. A $\log(V - V_0) - t$ grafikon látható az 5.7. ábrán. A kiértékelés során azt láttam, hogy nem lehet úgy megválasztani a V_0 feszültséget, hogy ez a görbe egyenessé váljon, az impulzus elején mindig nagyobb a $\log(V - V_0) - t$ görbe meredeksége, mint az impulzus végén.

Abban az esetben, ha a relaxáció $t^{-\alpha}$ hatványfüggvényt követ, mindkét tengelyen logaritmikus osztással egyenest kell kapnunk, aminek meredeksége megadja az α paramétert. Az 5.8. ábrán $\log(V - V_0) - \log(t)$ skálán kék színnel ábrázoltam a mérési adatokat. Zöld színnel az az exponenciális viselkedést leíró görbe látható, ami a folyamat első



5.8. ábra. A relaxáció logaritmikus skálán.

szakaszára illeszkedik. Ennek időállandója $45\mu\text{s}$. A folyamat végére illeszkedő exponenciális időállandója már két nagyságrenddel nagyobb (1.49 ms). Látható, hogy a relaxációt hatványfüggvénnyel sokkal jobban le lehet írni, mint exponenciálissal. A kitevő pontos értéke ebben a mérésben 0.84 -nek adódott, azonban ennek meghatározásához még több, nagyobb időtartományt lefedő mérésre van szükség.



5.9. ábra. Ellentétes irányú kapcsolás relaxációja

Ugyanezt a kiértékelést egy ellentétes irányú kapcsoláson mért jelre is elvégeztem (5.9. ábra). Ebben az esetben is hatványfüggvényt követ a relaxáció, a kitevő valamivel közelebb van egyhez, mint az előző esetben ($\alpha = 0.93$).

Összességében elmondható, hogy semelyik irányú kapcsolás esetén sem követ exponenciális függvényt a relaxáció, hatványfüggvénnyel jobban leírható a folyamat. Az ilyen típusú relaxációs folyamat az ú.n. gyenge relaxációk osztályába tartozik (weak relaxation [15]), melynek tipikus formája még a nyújtott exponenciális ($\exp(-(\frac{t}{\tau})^\beta)$) vagy a logarit-

mikus ($\log(t)$) relaxáció. A gyenge relaxáció jellemzője, hogy nagy felbontású mérésekkel hosszú ideig megfigyelhető – ezért lassúnak tűnik –, de valójában a rövid időskálán nagyobb változás történik, a folyamat egyúttal rendkívül gyors is. A hatványfüggvény vagy a logaritmikus változásnak nincs olyan vonása, ami alapján bármilyen időskálát rendelhetnénk hozzá. Ezek az empirikus formulák aszimptotikus határesetben nyilvánvalóan sértik a fizika törvényeit, mégis olykor 6-8 nagyságrenden keresztül megfigyelhetők.

A gyenge relaxációk tipikus példáit a sok szabadsági fokú rendszerek szolgáltatják, mint pl. a spinűvek. A folyamat formálisan leírható a relaxációs idők széles folytonos $g(\tau)$ eloszlásával:

$$\int g(\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d\tau, \quad (5)$$

ahol $g(\tau) = \delta(\tau - \tau_0)$ felel meg a szokásos exponenciális relaxációnak. Az ilyen megközelítés mögé a „parallel relaxáció” fizikáját képzelhetjük, azaz egy inhomogén minta egyes tartományaiban az eltérő sebességű folyamatok párhuzamosan zajlanak.

A fenti megközelítésnél mélyebb fizikát tartalmaznak az olyan mikroszkopikus modellek, amelyek a sok szabadsági fokú rendszeren belül a folyamatok hierarchiáját tételezik fel: egy relaxációs lépés megváltoztatja rendszeren belüli kölcsönhatásokat, és a relaxáció ebben a megváltozott környezetben már másképpen folytatódik. Úgy gondoljuk, hogy a memrisztorok kapcsolási dinamikája is ilyen hierarchikus relaxációs folyamat, aminek leírására molekuladinamikai szimulációk lehetnek a legalkalmasabbak [16].

A fenti folyamatok az impulzus alatti időfüggés mérése mellett, a különböző hosszúságú impulzusokat, illetve impulzussorozatokot követő kis terű ellenállásmérésekkel is nyomon követhetők (legegyszerűbb példa az egyetlen impulzus által kiváltott kapcsolat mérése, lásd 5.5. ábra). Ez a módszer lehetőséget biztosít a tér nélküli állapotban történő relaxáció megfigyelésére is.

6. Összefoglalás

Eddigi munkám során megismerkedtem a memrisztorok elméletének alapjaival, azon belül is az Ag_2S rendszer ellenállás-változásának hátterével. Megépítettem egy mérőrendszert, ami alkalmas fémes tűvel létrehozott kontaktusok kapcsolási dinamikájának rövid- és hosszútávú vizsgálatára. A rendszerhez mérésvezérlő programot írtam, ami képes vezérelni a piezoelektromos mozgókat, ezáltal automatikusan kontaktusokat létrehozni, valamint ezek ellenállását monitorozni, feszültség-áram karakterisztikájukat felvenni. Az első méréseket elvégeztem, ez alapján elmondható, hogy a lezajló kapcsolat időbeni folyamata nem jellemezhető egyetlen időállandóval, hanem hatványfüggvény lecsengést követ. Ennek köszönhetően ugyan egészen hosszú, akár néhány milliszekundum időskálán is látunk relaxációt, de nagyságrendekkel kisebb, akár párszor tíz nanoszekundumos skálán is már jelentős ellenállás-változás érhető el a megfelelő küszöbfeszültség felett. Ez az eredmény biztató az Ag_2S rendszer gyors memóriaként történő alkalmazása szempontjából.

További feladataim közé tartozik a relaxáció folyamatának szélesebb időskálákon történő tanulmányozása. Érdekes kérdés, hogy a létrejövő alacsony ellenállású állapot hosszú időskálákon is fennmarad-e? Milyen kapcsolat van a relaxációs folyamat és az alkalmazott pulzus nagysága között? Mi a szerepe a különböző kondicionáló impulzusoknak? Milyen relaxáció megy végbe a kikapcsolt állapotban? Valamint az irodalmi áttekintésben az Ag_2S rendszer ellenállás-változásánál ismertetett folyamatban nagy szerepet játszik az, hogy az elektródák eltérő anyagból vannak. Azonban ha az inert elektróda felületén megkötődnek az aktív elektróda ionjai, a rendszer elveszti az aszimmetriáját. Így felmerül kérdés, hogy mitől marad bipoláris a kapcsolat? Esetleg ezüst tűvel is létrehozható ellenállás-változás? A továbbiakban ezekre a kérdésekre szeretnénk választ találni.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Halbritter Andrásnak és Dr. Cson-
tos Miklósnak munkám során nyújtott támogatásukért, továbbá Prof. Mihály Györgynek
a memrisztorok elméletébe való bevezetésért és a kísérleti technikák optimalizálásában
nyújtott segítségéért. Dr. Geresdi Attilának köszönöm az alacsony hőmérsékletű mérések
ismertetését, Magyarkuti Andrásnak a programozási jótanácsokat. Köszönettel tarto-
zom Dr. Simon Ferencnek a drybox használatáért, valamint Bujdosó Lászlónak az ezüst
rétegek párologtatásáért. Továbbá köszönöm a Szilárdtestfizika Laboratórium munkatár-
sainak, hogy munkám során bármilyen kérdéssel fordulhattam hozzájuk.

Hivatkozások

- [1] L. O. Chua. *Memristor - The Missing Circuit Element*. IEEE Transaction on Circuit Theory, **CT-18**, 5 (1971).
- [2] Y. Hirose and H. Hirose. *Polarity-dependent memory switching and behavior of Ag dendrite in Ag-photodoped amorphous As_2S_3 films*. Journal of Applied Physics, **47**, 2767 (1976).
- [3] R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, and K. Szot. *Redox-Based Resistive Switching Memories - Nanoionic Mechanism, Prospects and Challenges*. Advanced Materials, **21**, 2632 (2009).
- [4] K. Terabe, T. Nakayama, T. Hasegawa, and M. Aono. *Formation and disappearance of a nanoscale silver cluster realized by solid electrochemical reaction*. Journal of Applied Physics, **91**, 12 (2002).
- [5] A. Geresdi. *Local probing of electronic transport with point contact Andreev reflection measurements*. Ph.D. thesis, Budapest University of Technology and Economics (2011).
- [6] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams. *The missing memristor found*. Nature Letters, **453**, 80 (2008).
- [7] K. Terabe, T. Hasegawa, C. Liang, and M. Aono. *Control of local ion transport to create unique functional nanodevices based on ionic conductors*. Science and Technology of Advanced Materials, **8**, 536 (2007).
- [8] A. Geresdi, A. Halbritter, E. Szilágyi, and G. Mihály. *Probing of Ag-based Resistive Switching on the Nanoscale*. MRS Proceedings, **1331** (2011).
- [9] A. Geresdi, A. Halbritter, A. Gyenis, P. Makk, and G. Mihály. *From stochastic single atomic switch to nanoscale resistive memory device*. Nanoscale, **3**, 1504 (2011).
- [10] T. Sakamoto, H. Sunamura, H. Kawaura, T. Hasegawa, T. Nakayama, and M. Aono. *Nanometer-scale switches using copper sulfide*. Applied Physics Letters, **82**, 3032 (2003).
- [11] M. Kozicki, C. Gopalan, M. Balakrishnan, and M. Park. *Non-volatile memory based on solid electrolytes*. Proc. IEEE Non-Volatile Memory Technology Symp, 10–17 (2004).

- [12] Y. Bernard, P. Gonon, and V. Jousseau. *Resistance switching of Cu/SiO₂ memory cells studied under voltage and current-driven modes*. Applied Physics Letters, **96**, 193502 (2010).
- [13] A. C. Torrezan, J. P. Stachan, G. Medeiros-Ribeiro, and R. S. Williams. *Sub-nanosecond switching o a tantalum oxide memristor*. Nanotechnology, **22**, 485203 (2011).
- [14] http://www.attocube.com/nanoPOSITIONING/working_principal.html.
- [15] R. Kohlrausch. *Theorie des elektrischen Rückstandes in der Leidner Flasche*. Annalen der Physik und Chemie, **91**, 179 (1854).
- [16] Wang, T. Kadohira, T. Tada, and Satoshi. *Nonequilibrium Quantum Transport Properties of a Silver Atomic Switch*. Nano Letters, **7**, 2688 (2007).