

dc_885_14

ELEKTRONTRANSPORT ATOMI MÉRETSKÁLÁN

című

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Halbitter András

Budapest

2014

Motiváció és célkitűzések

A félvezető ipar hihetelen fejlődésével a hétköznapiakban is szembesülünk: évről évre egyre gyorsabb számítógépek és egyre *többet tudó* mobiltelefonok vesznek körül minket. Ezen fejlődés háttérében részben az áll, hogy az elektronikai eszközök miniatürizálása miatt egy integrált áramkör évről évre lényegesen több építőelemet tartalmaz. Napjainkban egy térvezérlésű tranzisztor aktív tartományának a szélessége néhányszor tíz nanométer, ami egy exponenciális tendenciát mutató méretcsökkenésnek a jelenlegi stádiuma. Ezt az exponenciális méretcsökkenést előre vetítve pár évtized múlva egy tranzisztor vagy egy memóriaelem csupán pár atomból kellene hogy felépüljön. Mivel a félvezető ipar már napjainkban is a fizikai és technológiai határait feszegeti, így a nanofizikai kutatások egyik legjelentősebb kihívása a hagyományos félvezető technológiákon túlmutató nanoelektronikai eszközök fejlesztése.

Míg az alkalmazott kutatások a rövid időskálán belül bevezethető, soron következő technológiai fejlesztések megvalósításával foglalkoznak, addig alapkutatások szintjén fel lehet tenni a kérdést, hogy hogyan viselkednek az elképzelhető legkisebb elektronikai eszközök, melyekben az áram akár egyetlen atomon, vagy egyetlen molekulán keresztül folyik. Ezen kérdéskör vizsgálatával az egyedi molekulákból kialakított tranzisztorokat, memóriákat vagy szenzorokat vizionáló, *molekuláris elektronika* néven emlegetett kutatási terület foglalkozik. Ez a terület a sötétben tapogatózva indult, hiszen egyrészt az atomi méretskálán lezajló önszerveződő folyamatok nehezen megjósolhatók, másrészt az esetek nagy részében pontos képet adó mikroszkópiai eljárás nélkül, közvetett mérések segítségével kell feltérképezni a lezajló fizikai folyamatokat. Ugyan a molekuláris elektronika még távol áll a hétköznapi alkalmazástól, mégis elmondható, hogy az elmúlt évtizedben ez a kutatási terület óriási fejlődésen ment keresztül, és napjainkban hatékony mérés technikák állnak rendelkezésre egyedi molekulákból kialakított eszközök vizsgálatára.

MTA doktori értekezésem jelentős részében a molekuláris elektronika területén kifejtett eredményeimet ismertetem, melynek keretében olyan kérdésekre keresem a választ, hogy hogyan hatnak kölcsön különböző fémek

egyszerű molekulákkal, és hogy különböző mérési eljárások ötvözésével hogyan lehet viszonylag teljes képet alkotni az önszerveződő módon kialakuló molekuláris nanovezetékekről.

A molekuláris elektronika mellett számos további kutatási irány keresi a jelenlegi félvezető technológiák alternatíváit. Kifejezetten érdekes terület a memrisztorok fizikája, melyek olyan passzív áramköri elemek, amiknek az ellenállása függ az *előéletüktől*. Egy ionosan vezető nanokontaktusban megfelelően nagy feszültség hatására kialakítható egy jól vezető, fémes nanovezeték a két elektróda között, míg ellentétes polaritású feszültséggel ez a nanovezeték lebontható, azaz megfelelően nagy feszültség segítségével információt írhatunk egy parányi nanokontaktusba, míg alacsony feszültségnél a memória állapotának megváltoztatása nélkül kiolvashatjuk az információt. Szintén alapvető jelentőségűek a spintronikai kutatások, azaz olyan eszközök fejlesztése, melyekben az információt az elektronok spinje hordozza.

A molekuláris elektronikai kutatásokhoz hasonló kísérleti eszközök segítségével MTA doktori értekezésemben a memrisztorok fizikájához és a spintronikai kutatásokhoz kapcsolódó eredményeket is bemutatok. Ezüstszulfid alapú memrisztorok segítségével azt a kérdést vizsgálom, hogy lehet-e olyan memóriaelemeket készíteni, melyek egyszerre kicsik (közel atomi méretűek), és gyorsak (akár GHz-es működési sebességre is alkalmasak). A spintronika területén a spinpolarizáció lokális, nanométeres skálájú mérésének a lehetőségét vizsgálom szupravezető Andrejev-spektroszkópia segítségével.

Kísérleti módszerek

Egy olyan nanovezetéket, melyben az áram egyetlen atomon keresztül folyik bárki könnyen létrehozhat, csak egy feszültségforrásra kötött fémdrótot kell elszakítani ehhez. A drót a szakadás közben elkezd vékonyodni, és a teljes szétszakadás előtti utolsó pillanatban általában csak egyetlen atom köti össze a két oldalt. Persze joggal merül fel a kérdés, hogy miből következtethetünk az atomi méretű kontaktus kialakulására. Ezen kérdés vizsgálatához a drótszakító kísérletet érdemes olyan körülmények között elvégezni, hogy az

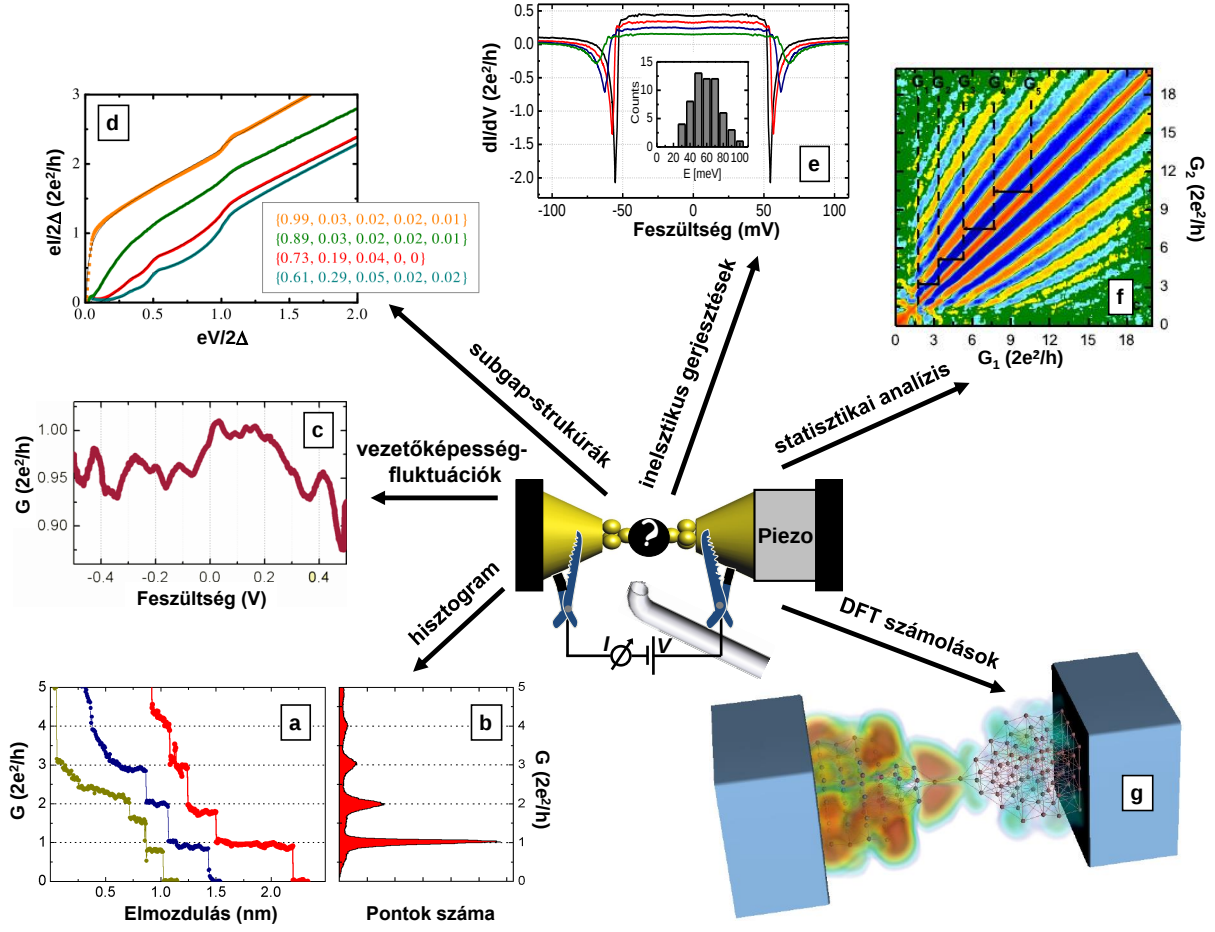
egyetlen atomból álló kontaktus kialakulásakor lehetőség nyílik a kontaktus stabilizálására, és részletesebb tanulmányozására.

A pásztázó alagútmikroszkóp (STM) feltalálása óta már nem elérhetetlen cél az anyag atomi szintű feltérképezése és manipulálása. Magát a pásztázó alagútmikroszkópot is használhatjuk egy egyatomos kontaktus kialakítására. Ehhez először a tűt a mintafelületbe nyomjuk, majd egy nagyobb kontaktus kialakulása után elkezdjük távolítani a felülettől egészen addig, míg a nanovezeték annyira elvékonyodik, hogy a legszűkebb tartományban az áram csak egyetlen atomon keresztül folyik. A pásztázó alagútmikroszkópnál is nagyobb stabilitást érhetünk el az ún. mechanikusan szabályozható törőkontaktus technika segítségével. Ennél a módszernél egy fémszálat két ragasztópöttyel egy laprugóra rögzítünk, és a laprugó hajlításával szakítjuk el a vezetéket. A *drótszakítás* mindkét módszernél kontrollált körülmények között, egy finoman hangolható piezomozgató segítségével történik. A mérések nagy részénél a kialakuló atomi méretű kontaktust nem látjuk közvetlen mikroszkópiai módszerrel, így annak viselkedését – mint egy fekete dobozt – különböző indirekt mérési módszerek segítségével lehet feltérképezni.

Kutatási eredményeim fontos részét képezi egy olyan mérőrendszer fejlesztése, mellyel akár mechanikusan szabályozható törőkontaktus, akár pásztázó alagútmikroszkóp elrendezésben nagystabilitású, atomi méretű nanovezetékek hozhatók létre. Az elkészült mérőrendszerekkel számos mérési eljárás elvégezhető, melyeket az 1. és a 2. ábra szemléltet.

A legalapvetőbb módszer a fémszál vezetőképességének mérése a szakadás közben. Egy atomi méretskálájú nanovezeték vezetőképessége szakítás közben lépcsőzetesen változik (1./a ábra), a hirtelen vezetőképesség-ugrások atomi átrendeződéseknek felelnek meg: az ugrás után már kevesebb atom köti össze a két oldalt. A szétszakadás előtti utolsó platónál az áram általában csak egyetlen atomon keresztül folyik.

Ha a szakítás után a két elektródát összenyomjuk, a szakítási felületen az atomok újra összekapcsolódnak, így a nanovezeték szakítását újra és újra megismételhetjük. Az egymás utáni szakítások közben felvett *vezetőképesség-görbék* ugyan jellegre hasonlóak, azonban a szakadás sztochasztikus jel-



1. ábra. Az atomi méretű „fekete doboz” vizsgálatára alkalmazott módszerek szemléltetése. (a): Vezetőképesség-görbék, azaz a nanokontaktus vezetőképessége az elektródák elmozdulásának függvényében. (b): Vezetőképesség-hisztogram, azaz az egyes vezetőképességek előfordulási gyakorisága több ezer vezetőképesség-görbe alapján. (c): Vezetőképesség-fluktuációk, azaz kvantuminterferencia-jelenségek a differenciális vezetőképességben. (d): Subgap-struktúrák szupravezető elektródák között kialakított kontaktus $I(V)$ görbéjében. (e): Inelasztikus gerjesztések detektálása a kontaktus differenciálisvezetőképesség-görbéivel. (f): A vezetőképesség-görbék statisztikai analízise keresztkorreláció-számítással. (g): Feltételezett konfigurációk szimulálása elméleti módszerekkel.

lege miatt a részletek jelentősen eltérnek. Több ezer szakítás során felvett vezetőképesség-görbéből készíthetünk egy hisztogramot, melyben csúcsok jelennek meg a gyakran előforduló atomi elrendeződések vezetőképesség-értékeinél (1./b ábra). Az első csúcs általában az egyatomos kontaktus vezetőképességét adja meg.

A fémszál elszakadása után egy nagyon keskeny nanorés jön létre, mely

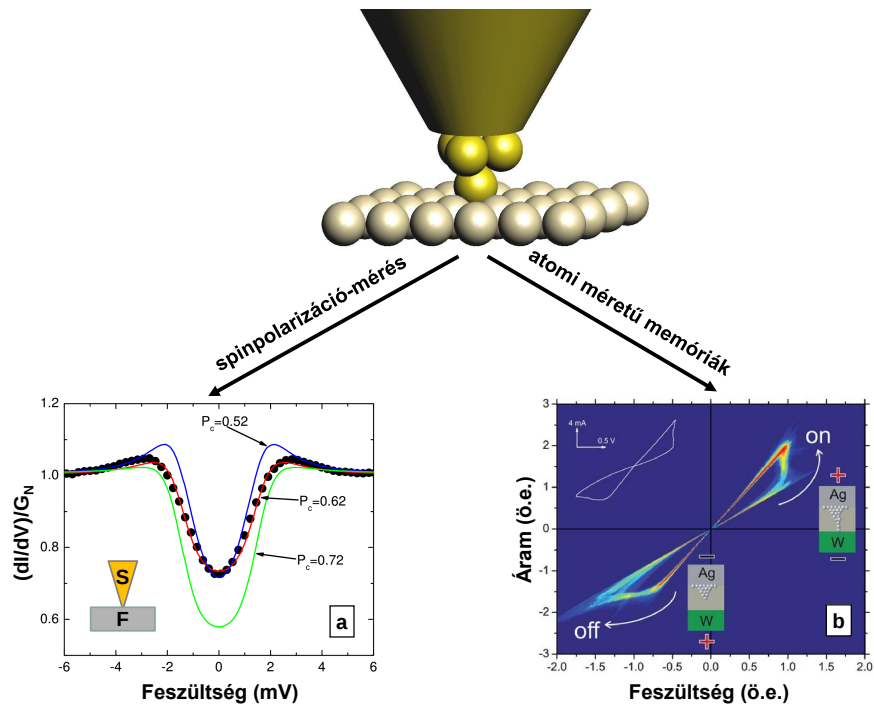
kiválóan alkalmas egyedi molekulák kontaktálására. Az adott fémmel megfelelően kölcsönható molekulák jelenlétében önszerveződő módon kialakulhat egy olyan nanovezeték, melyben egyetlen molekula köti össze a két elektródát. Mindezt a vezetőképesség-hisztogramon egy új csúcs megjelenése jelzi, melyről az egymolekulás kontaktus vezetőképessége leolvasható.

A nanokontaktusok vezetési tulajdonságait leíró *transzmissziós valószínűségekről* részletesebb információt nyerhetünk speciális mérésekből, úgy mint vezetőképesség-fluktuációk mérése (1./c ábra), és szupravezető subgap-struktúrák mérése (1./d ábra).

Míg a transzmissziós együtthatók a kontaktuson történő rugalmas szóródásokat jellemzik, egyszerű mérési eljárással vizsgálhatjuk a kontaktus rugalmatlan (inelasztikus) gerjesztéseit is (1./e ábra). Ezen folyamatok a gerjesztési energiánál tapasztalható nemlinearitásként jelentkeznek a feszültség-áram-karakterisztikákban.

Az előbbieken ismertetett módszerek speciális körülményeket, alacsony hőmérsékletet és zajszintet, illetve kiemelkedő mechanikai stabilitást igényelnek. Kutatásaim során nagy hangsúlyt fektettem arra, hogy olyan módszereket fejlesszek ki, melyek csupán a 1./a ábrán szemléltetett vezetőképesség-görbék újszerű statisztikai analíziséen alapulnak, és mégis a vezetőképesség-hisztogramon jelentősen túlmutató információt szolgáltatnak a vizsgált nanovezetékekről (1./f ábra).

Molekuláris nanovezetékek vizsgálatánál kifejezetten hasznos a mechanikusan szabályozható törőkontaktus-technika alkalmazása, hiszen ez a módszer kiemelkedő stabilitást, és tiszta, frissen szakított elektródákat biztosít. Bizonyos méréseknél azonban kifejezetten előnyös, ha két különböző anyag (egy pásztázó alagútmikroszkóp tűje és mintája) között tudunk atomi méretű nanovezetéket kialakítani (2. ábra). Ebben az elrendezésben vizsgálhatók memrisztorok kapcsolási tulajdonságai (2./b ábra), illetve szupravezető tű alkalmazásával ebben az elrendezésben tanulmányozható ferromágneses minták lokális, nanométeres skálájú spinpolarizációja (2./a ábra).



2. ábra. További mérési lehetőségek nyílnak meg akkor, ha egy atomi méretskálájú nanokontaktust két különböző anyag között alakítunk ki pásztázó alagútmikroszkóp elrendezésben. (a): Egy ferromágneses minta és egy szupravezető tű közötti nanokontaktus differenciálisvezetőképesség-görbéjének illesztéséből a minta lokális, nanométeres skálájú spinpolarizációja meghatározható. (b): Egy ezüstmintára felvitt ezüstsulfid felület és egy elektrokémialilag inert tű közötti nanokontaktus memóriaként viselkedik: az Ag elektródára alkalmazott megfelelően nagy pozitív feszültség esetén egy fémes nanokontaktus alakul ki a két elektróda között, ami ellentétes polaritású feszültséggel lebontható.

Új tudományos eredmények

MTA doktori értekezésemben atomi és molekuláris nanovezetékek, nanométeres skálájú memrisztorok és ferromágneses nanokontaktusok vizsgálatáról számolok be. Mivel tudományos tevékenységem egyik fontos eredményének tartom a fentiekben röviden bemutatott mérőrendszer fejlesztését, így a kutatási eredményeimet összefoglaló tézispontokat is a mérőrendszerrel elvégezhető vizsgálati módszerek szerint csoportosítom:

1. Vezetőképesség-fluktuációk

Vezetőképességfluktuáció-mérések segítségével tanulmányoztam atomi és molekuláris kontaktusok viselkedését.

Megmutattam, hogy arany nanokontaktusokban a vezetési csatornák egymás utáni kinyílása csupán a vezetőképesség-görbék numerikus deriváltjának statisztikai analízise alapján demonstrálható. Ez az eredmény egyben azt is szemlélteti, hogy a vezetőképesség-platók finomszerkezetéhez a kvantuminterferencia-korrekciók jelentős járulékot adnak [1].

Pd-H₂ kontaktusokon végzett vezetőképesség-fluktuáció mérésekkel megmutattam, hogy a Pt-H₂ kontaktusokkal ellentétben a hidrogén hatására 1 G₀ vezetőképességnél megjelenő új konfiguráció nem egyetlen tökéletesen transzmittáló vezetési csatornával rendelkezik [2], azaz nem egy Pd-H₂-Pd egymolekulás kontaktusnak felel meg.

2. Inelasztikus gerjesztések

Különböző molekuláris rendszerek inelasztikus gerjesztéseit vizsgáltam pontkontaktus-spektroszkópiával.

Mezoszkopikus palládium-hidrogén kontaktusokban a Pd rácsba beoldódott hidrogénhez kötődő fononmódusokat mutattam ki [2], mely magyarázatot ad a palládiumelektrodák között kialakuló hidrogén molekuláris kontaktus platinától eltérő viselkedésére, hiszen a kontaktus tiszta palládium helyett

jelentősen eltérő sávszerkezetű palládium-hidrid elektródák között alakul ki. Ezen eredmény jól szemlélteti, hogy egyedi molekulákból kialakított kontaktusok vezetési tulajdonságai a molekula tulajdonságai mellett alapvetően függnak a kontaktáló elektródák elektronszerkezetétől is.

Arany-hidrogén rendszeren vizsgáltam a feszültség-áram-karakterisztikában kialakuló negatív differenciális vezetőképesség jelenséget [3], melyre egy egyszerű kétállapotú rendszer modell [3,4] segítségével adtam magyarázatot. Vizsgálataim megmutatták, hogy a negatív differenciális vezetőképesség jelensége jól magyarázható egy erősen kötött molekuláris állapot nagyszámú, gyengén kötött állapotba történő gerjesztésével.

3. Szupravezető subgap-struktúrák

Különböző atomi méretű kontaktusokat vizsgáltam szupravezető subgap-spektroszkópiai mérések segítségével [5–7]. Az irodalomban szokásos egyedi kontaktusokon végzett vizsgálatok helyett bevezettem a mért transzmissziós együtthatók statisztikai analízisét, melynek segítségével az egyes csatornák kinyílása/bezáródása jól követhető a teljes vezetőképesség függvényében. Ezen módszer segítségével teszteltem egy elméleti csoporttal együttműködésben fejlesztett, hisztogramok elméleti szimulálására alkalmas újszerű módszert [5]. A szimulációk és a kísérletek vezetési csatornák szintjén történő egybevetése egyértelmű bizonyítékot adott arra, hogy a fejlesztett szimulációs módszer a szokásos, ideális konfigurációk tanulmányozásán alapuló megközelítésnél lényegesen valósághűbb eredményt szolgáltat.

4. Atomláncok és molekulák kölcsönhatásának vizsgálata

Atomláncok és molekulák kölcsönhatását vizsgáltam a vezetőképesség-görbék újszerű, a vezetőképesség-hisztogramokon túlmutató statisztikai analízise segítségével. Bevezettem a feltételes hisztogramok, feltételes

platóhosszúság-hisztogramok és feltételes kétdimenziós vezetőképességörbe-hisztogramok módszerét.

Megmutattam, hogy hidrogénmolekulák beépülhetnek arany atomláncokba, és az arany-hidrogén kötés elég erős ahhoz, hogy ezen keresztül további atomokat húzzunk a láncba [7, 8].

Nagyobb molekulák vizsgálatához molekulák alacsonyhőmérsékleti adagolására alkalmas mérőrendszert fejlesztettem, mellyel részletesen tanulmányoztam platinakontaktusok és szénmonoxid molekulák kölcsönhatását. Megmutattam, hogy általában a tiszta platina atomláncok kialakulása előtt egy merőleges állású CO molekula kötődik a kontaktusba, melyen keresztül platina atomláncok húzhatók. A láncképződés közben az esetek jelentős részében a merőleges állású molekula párhuzamos állásba fordul, és a párhuzamos állású CO molekula is elég erős kötést alkot a további lánc húzásához [9].

5. Korrelációanalízis

Bevezettem egy általánosan használható, korrelációanalízisen alapuló módszert törőkontaktus technikával felvett vezetőképesség-görbék vizsgálatára [10, 11]. Míg a vezetőképesség-hisztogram csupán a hisztogramcsúcsokkal reprezentált különböző atomi és molekuláris konfigurációk jelentkezését jelzi, addig a kétdimenziós korrelációs diagramok segítségével az egyes vezetőképesség-tartományok egymáshoz való viszonya is tanulmányozható, megállapítható hogy két kontaktuskonfiguráció egymástól függetlenül alakul-e ki, esetleg együtt, vagy egymást kizárva szeretnek jelentkezni. A korrelációanalízis segítségével Ni kontaktusok rendezett, atomonkénti szakadási folyamatát sikerült kimutatni [10], melynek jelei a hagyományos vezetőképesség-hisztogramon egyáltalán nem látszanak.

Demonstráltam, hogy a korrelációanalízis jól használható molekuláris kontaktusok vizsgálatára is. Ezüst-oxigén [12] és ezüst-szénmonoxid kontaktusokban korrelációs diagramok segítségével sikerült prekursor-konfigurációkat azonosítani, azaz megmutatni, hogy a hisztogramcsúcsként jelentkező molekuláris konfiguráció kialakulása előtt is jelentkezik már a molekulák ha-

tása a vezetőképesség-görbéken. Bevezettem a széthúzási, illetve az azt követő összenyomási görbék közötti keresztkorreláció vizsgálatának módszerét, melynek segítségével megállapítottam, hogy Ag-CO-Ag kontaktusok szakadása után a molekula mereven kötődik az egyik elektróda csúcsához, és az összenyomás során is kialakul a szakítás közben jelentkező molekuláris konfiguráció.

6. Ezüstsulfid memrisztorok vizsgálata

Különböző anyagú elektródák közötti atomi méretű heterokontaktusok kialakítására alkalmas alacsony hőmérsékleti és szobahőmérsékleti mérőrendszer fejlesztettem. A mérőrendszer segítségével ezüstsulfid memrisztorok kontaktusok viselkedését tanulmányoztam [13–15]. Megmutattam, hogy vékony ezüstsulfid réteg esetén mind a kikapcsolt, mind a bekapcsolt állapot fémesen viselkedik [15], és a gyors alkalmazások szempontjából optimális ki- és bekapcsolt állapotbeli ellenállásértékek állíthatók be. Szupravezető Andrejev-spektroszkópia segítségével tanulmányoztam a memrisztorok kontaktusok két állapotának transzmissziós tulajdonságait [14], amely alapján kizártam, hogy a különböző állapotok nagy felületű, de kis transzmissziós valószínűségű alagútátmenetnek felelnének meg. Megmutattam, hogy a létrehozott magas transzmissziójú memrisztorok segítségével kialakíthatók a jelenlegi félvezető eszközöknél egy nagyságrenddel kisebb, pár nanométeres átmérőjű, jól definiált küszöbfeszültséggel és kapcsolási iránnyal rendelkező [13] memóriák, amelyek az optimális ellenállásuknak köszönhetően nagysebességű kapcsolásra is alkalmasak [14].

7. Spinpolarizáció mérése Andrejev-spektroszkópiával

Heterokontaktusok létrehozására alkalmas mérőrendszer segítségével sikeresen tanulmányoztam szupravezető-ferromágnes kontaktusokat, melyek feszültség-áram karakterisztikáiból a ferromágnesben kialakuló spinpolarizáció mértéke meghatározható. Mágneses félvezető minták vizsgálatával meg-

mutattam, hogy a módszer tömbi tulajdonságokban már nem látható, lokális, nanométeres skálájú spinpolarizáció kimutatására is alkalmas [16]. Ezen kívül megmutattam, hogy Andrejev-spektroszkópiai mérésekkel a spindiffúziós hossz meghatározása is lehetséges [17].

Az eredmények hasznosítása

Kutatási eredményeim alapkutatás jellegűek, így csak közvetve, a kutatási területre gyakorolt hatásukon keresztül járulnak hozzá gyakorlati alkalmazásokhoz.

A molekuláris elektronika terén az egyedi molekulákból készített hétköznapi alkalmazások még váratnak magukra, azonban a területen elért eredmények fontos alapként szolgálnak a gyakorlatban is használható sokmolekulás eszközök (pl. szenzorok, napelemek) építéséhez. A memrisztív rendszerek kutatása sok szempontból közvetlenebb, és gyorsabb alkalmazást tesz lehetővé, jelenleg már komoly informatikai cégek foglalkoznak memrisztorokból készített memóriaegységek fejlesztésével.

Saját eredményeim közül a molekuláris elektronika terén úgy gondolom, hogy az újszerű statisztikai kiértékelési módszerek bevezetése gyakorolta a legfontosabb hatást a tudományterületre, számos kutatólaboratóriumban alkalmazzák ezeket a módszereket. Memrisztorok kutatása kapcsán egy gyakorlati szempontból is alapvető fontosságú megállapítást tettem: megmutattam, hogy megfelelő módszerrel készíthetők olyan ezüstsulfid memrisztorok, melyek a jelenlegi félvezető eszközöknél lényegesen kisebbek, viszont hasonlóan gyors működést tesznek lehetővé. A spintronika területén az eredményeim legfontosabb hasznosulása mérés technikai jellegű: elsőként demonstráltam, hogy Andrejev-spektroszkópiával tömbi szinten nem látható, lokális spinpolarizáció is detektálható, illetve elsőként alkalmaztam ezt a módszert spindiffúziós hossz mérésére.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [1] A. Halbritter, S. Csonka, G. Mihály, O. I. Shklyarevskii, S. Speller, and H. van Kempen. *Quantum interference structures in the conductance plateaus of gold nanojunctions*. Phys. Rev. B, **69**, 121411 (2004).
- [2] S. Csonka, A. Halbritter, G. Mihály, O. I. Shklyarevskii, S. Speller, and H. van Kempen. *Conductance of Pd-H nanojunctions*. Phys. Rev. Lett., **93**, 016802 (2004).
- [3] A. Halbritter, P. Makk, S. Csonka, and G. Mihály. *Huge negative differential conductance in Au-H₂ molecular nanojunctions*. Phys. Rev. B, **77**, 075402 (2008).
- [4] A. Halbritter, L. Borda, and A. Zawadowski. *Slow Two-Level Systems in Point Contacts*. Advances in Physics, **53**, 939 (2004).
- [5] P. Makk, D. Visontai, L. Oroszl ny, D. Z. Manrique, S. Csonka, J. Cserti, C. Lambert, and A. Halbritter. *Advanced simulation of conductance histograms validated through channel-sensitive experiments on indium nanojunctions*. Phys. Rev. Lett., **107**, 276801 (2011).
- [6] P. Makk, S. Csonka, and A. Halbritter. *Effect of hydrogen molecules on the electronic transport through atomic-sized metallic junctions in the superconducting state*. Phys. Rev. B, **78**, 045414 (2008).

- [7] A. Halbritter, S. Csonka, P. Makk, and G. Mihály. *Interaction of hydrogen with metallic nanojunctions*. Journal of Physics-Conference Series, **61**, 214 (2007).
- [8] S. Csonka, A. Halbritter, and G. Mihály. *Pulling gold nanowires with a hydrogen clamp: Strong interactions of hydrogen molecules with gold nanojunctions*. Phys. Rev. B, **73**, 075405 (2006).
- [9] P. Makk, Z. Balogh, Sz. Csonka, and A. Halbritter. *Pulling platinum atomic chains by carbon monoxide molecules*. Nanoscale, **4**, 4739 (2012).
- [10] A. Halbritter, P. Makk, S. Mackowiak, S. Csonka, M. Wawrzyniak, and J. Martinek. *Regular Atomic Narrowing of Ni, Fe, and V Nanowires Resolved by Two-Dimensional Correlation Analysis*. Phys. Rev. Lett., **105**, 266805 (2010).
- [11] P. Makk, D. Tomaszewski, J. Martinek, Z. Balogh, Sz. Csonka, M. Wawrzyniak, M. Frei, L. Venkataraman, and A. Halbritter. *Correlation Analysis of Atomic and Single-Molecule Junction Conductance*. ACS Nano, **6**, 3411 (2012).
- [12] S. V. Aradhya, M. Frei, A. Halbritter, and L. Venkataraman. *Correlating Structure, Conductance, and Mechanics of Silver Atomic-Scale Contacts*. ACS Nano, **7**, 3706 (2013).
- [13] 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).
- [14] A. Geresdi, M. Csontos, A. Gubicza, A. Halbritter, and G. Mihály. *A fast operation of nanometer-scale metallic memristors: highly transparent conductance channels in Ag₂S devices*. Nanoscale, **6**, 2613 (2014).
- [15] A. Geresdi, A. Halbritter, E. Szilágyi, and G. Mihály. *Probing of Ag-based Resistive Switching on the Nanoscale*. MRS Proceedings, **1331**, 38 (2011).

- [16] A. Geresdi, A. Halbritter, M. Csontos, S. Csonka, G. Mihály, T. Wojtowicz, X. Liu, B. Janko, and J. K. Furdyna. *Nanoscale spin polarization in the dilute magnetic semiconductor (In,Mn)Sb*. Phys. Rev. B, **77**, 233304 (2008).
- [17] A. Geresdi, A. Halbritter, F. Tanczikó, and G. Mihály. *Direct measurement of the spin diffusion length by Andreev spectroscopy*. Applied Physics Letter, **3**, 212507 (2011).