

## Spin polarizáció nanoszerkezetekben

OTKA nyilvántartási szám: NK72916, futamidő: 2008. április 1 – 2012. március 31.

A projekt keretében összesen 15 publikáció készült. Nívós nemzetközi folyóiratokban jelent meg 12 publikáció, impakt faktor összegük: **64.485**. A fémes Ag-S memrisztorokra vonatkozó legújabb eredmények a Material Research Society konferenciáján kerültek bemutatásra (San Francisco, 2011), illetve két kézirat megjelentetése folyamatban van. Az összes közleményt tartalmazó publikációs jegyzék megtekinthető a

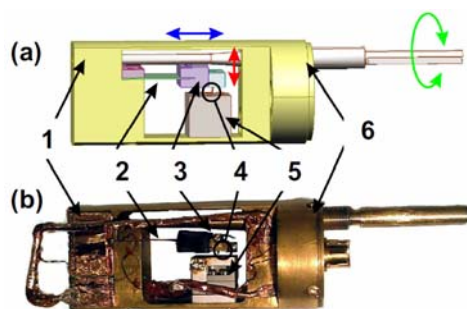
<http://dept.phy.bme.hu/NK72916/>

internet címen, ahonnan a cikkek (és a kéziratok) pdf formában teljes terjedelemben is letölthetők.

### Kutatási eredmények

#### 1. Piezoelektromos mérőrendszer

A projekt egyik célkitűzése volt a szupravezető tűk és ferromágneses minták közötti nanokontaktusok kialakítására alkalmas piezoelektromos mérőrendszer továbbfejlesztése. Az alacsonyhőmérsékleti kísérletekben alkalmazott mérőrendszer számítógépes modelljét és fényképét az 1. ábra szemlélteti. A mintatartóban a kúpos tengely közvetlenül a szupravezető tűt mozgatja, a vizsgált minta pedig a piezo-mozgató tetején került elhelyezésre. Megvalósítottuk a minta felületének alagútáramra visszacsatolt megközelítését, amivel az 1-100 nm tartományban stabil heterokontaktusokat tudunk létrehozni. A laterális mérésekhez kétfokozatú mozgatót alakítottunk ki: a vizsgált minta letapogatását egy ANSxyz100 típusú, három aktív tengellyel rendelkező piezo mozgató végzi, amelynek maximális elmozdulása mintegy  $40 \times 40 \times 24 \mu^3$ .



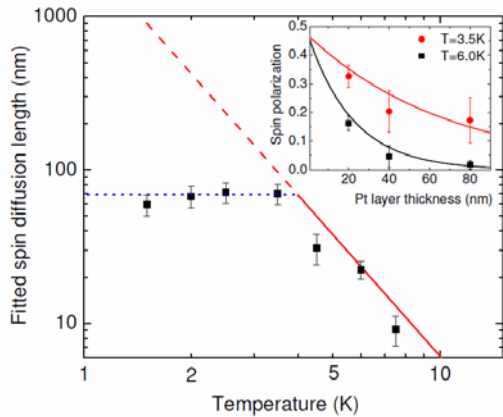
1. ábra.

Heterokontaktusok létrehozására alkalmas mérőrendszer számítógépes modellje és fényképe. A kúpos tengely felső része egy finommenettel (6), alsó része pedig egy hengeres megvezetéssel (1) kapcsolódik a mintatartó testéhez. A kúp egy laprugó (2) végén elhelyezett elemet (3) mozgat, melyhez a tűt (4) rögzítjük. A minta a 3D piezo mozgató (5) felső lapján kerül elhelyezésre.

Nagyfrekvenciás elektromos mérések végzésére egy inert gáztérben működő szobahőmérsékleti rendszert is építettünk, inerciális (ún. „inchworm”) piezo alkalmazásával. Míg az alacsony hőmérsékleti kísérletekben a hélium kriosztát megszorítást jelent a levezető huzalozásra, a szobahőmérsékleti mintatartóban egy semi-rigid koax kábellel közvetlenül a nagyfrekvenciás alkalmazáshoz illesztett impedanciájú kontaktushoz csatlakozunk.

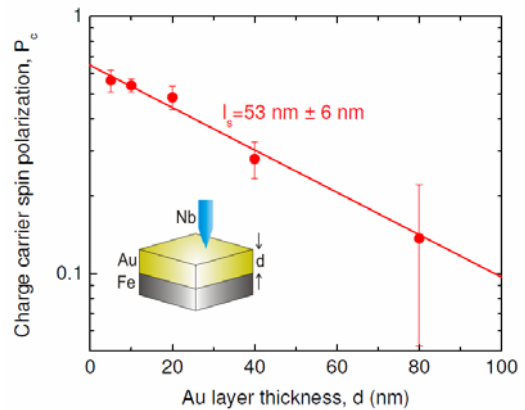
## 2. Spin polarizáció detektálása Andrejev spektroszkópiával

Tanulmányoztuk a spin polarizációs állapot terjedését paramágneses fémekben. Ferromágneses Co felületére növesztett Pt rétegeken pont-kontaktus Andrejev spektroszkópiával mértük a spin polarizáció mértékét a rétegvastagság és a hőmérséklet függvényében. Az általunk elsőként alkalmazott módszer spin szelektivitását jelzi, hogy a spin-flip folyamatokat az akár három nagyságrenddel gyakoribb momentum-szórás mellett is képes detektálni. Meghatároztuk a spin diffúziós hossz hőmérsékletfüggését, és megmutattuk, hogy – a naiv várakozással ellentétben – a spin- és a momentum-relaxációs idő aránya nem állandó. Méréseink alapján a spin diffúziós hossz szaturálódása jelentősen alacsonyabb hőmérsékleten kezdődik el, mint ahol a maradékellenállás megjelenik. A spin élettartamot az elektron-fonon kölcsönhatás a spin-pálya csatoláson keresztül limitálja. Kísérleteink arra utalnak, hogy ez a folyamat még akkor is dominál a szennyezők potenciál szórásától származó tag felett, amikor az fonon szórás járuléka az ellenállásban már elhanyagolható.



2. ábra.

A spin diffúziós hossz hőmérsékletfüggése kobaltra növesztett platina mintában. A piros vonal jelzi az elektron-fonon szórás járulékát. A spin diffúziós hossz telítési értéke a platina-ban  $67 \pm 5 \text{ nm}$ . A kísérletekből nagy pontossággal meghatároztuk a kobalt vezetési elektronjainak spin polarizációját:  $P_{Co} = 0.41 \pm 0.04$ .



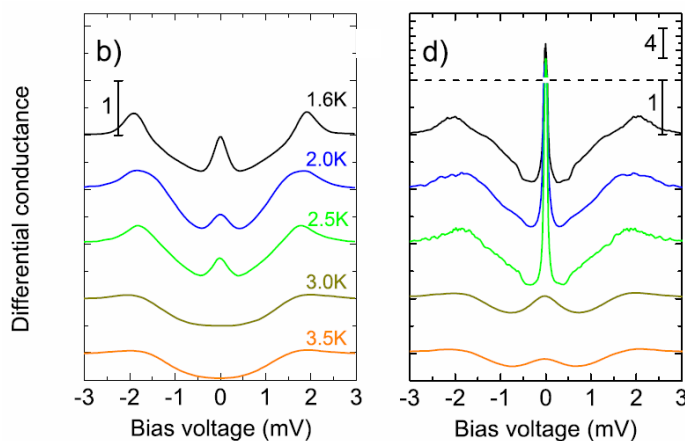
3. ábra.

Vas minta feletti vékony arany réteg tetején mért spin-polarizáció a rétegvastagság függvényében. A kísérletileg megfigyelt exponenciális lecsengés alapján a spin diffúziós hossz az aranyban  $53 \pm 6 \text{ nm}$ , míg az Fe vezetési elektronjainak spin polarizációja:  $P_{Fe} = 0.65 \pm 0.05$ .

A fémes rendszerek mellett mágneses (In,Mn)Sb mágneses félvezetőkön is meghatároztuk a spin polarizáció alacsony hőmérsékleti értékét, és hőmérsékletfüggését. A spin polarizációs jelenségkör Landauer formalizmus keretében történő értelmezéséről készült összefoglaló cikkünk kéziratát letölthető a <http://dept.phy.bme.hu/NK72916/> internet címről.

### 3. Ballisztikus-diffúzív átmenet és proximity effektus

A laterális mérésekhez kifejlesztett Andreev-spektroszkópai elrendezéssel  $T = 4$  K alatti mérésekkel tanulmányoztuk a szupravezető-fém határátmenet mezoszkópikus transzportjelenségeit. A Nb tüvel kialakított kontaktus méretét a 10-300 nm tartományban változtatva vizsgáltuk a ballisztikus-diffúzív átmenetet. A diffúzív limitben megmutattuk, hogy a fémes oldalon fellépő fáziskohereNS visszaszóródás jelensége fokozatosan Josephson-effektussá alakul át. Értelmezésünk szerint a fáziskohereNS térfogat növekedésével a fémes oldalon proximity-szupravezetés jön létre, és a többszöri visszaverődéstől származó korábbi ún. „kohereNCia-csúcsot” a Cooper-párok alagutazása váltja fel.



4. ábra

*Az alacsony hőmérsékleten megfigyelt zero-bias anomália a fáziskohereNS szórások következtében kialakuló „kohereNCia csúcs” jelenséget tükrözi (bal oldal).*

*A kohereNS térfogat növelésével (jobb oldali ábra) minőségi változás lép fel: alacsony hőmérsékleten a fémes tartományban proximity szupravezetés alakul ki (a szaggatott vonal kohereNCia csúcs elvi határát jelzi).*

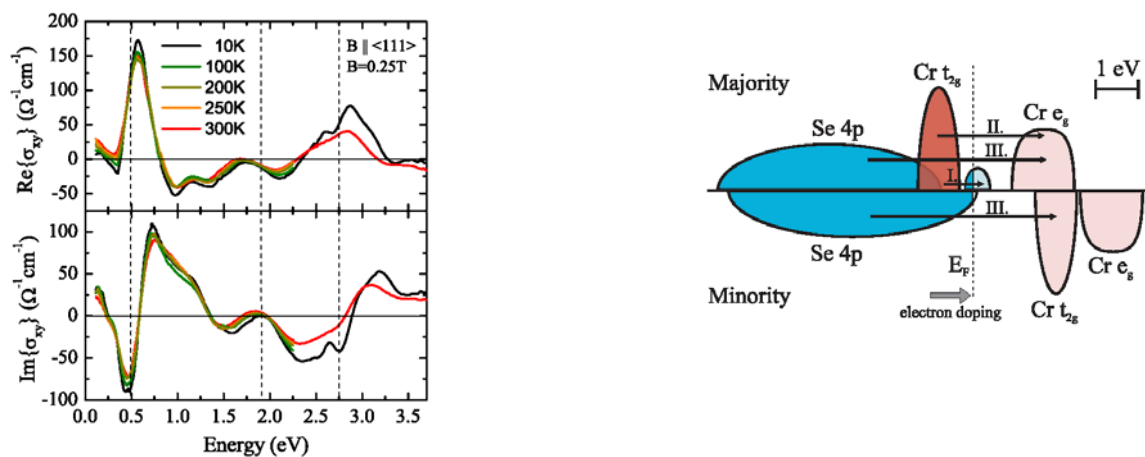
### Elmaradt Andrejev mérések

Az Andrejev-kísérletek között tervezett d-hullámú szupravezető vizsgálatok és a projekt keretében épített laterális piezoelektromos mérőrendszer mikroszkópia alkalmazása nem valósult meg. A kutatások irányát és a berendezés használatát módosította az AgCo granuláris rendszerek mikroszkópai kísérletei során felismert Ag-S memrisztor jelenség – amint azt a projekt 2. részjelentésében jeleztük. Ezt követően eljárást dolgoztunk ki a felületi kén adszorciónal keletkező nanométeres Ag-S ionvezető rétegek tervezett készítésre. A projekt keretében épített, laterális piezoelektromos mozgató berendezés az azonos minta különböző pontjaiban végzett több tízezer mérés statisztikai analizését tette lehetővé, amivel szétválasztottuk az atomi migrációhoz tartozó kapcsolatokat és az ionos eredetű memrisztor-effektust. Ezek a megfigyelések, valamint a memrisztor paraméterek Andrejev spektroszkópai meghatározása lényeges új eredményekre vezettek (lásd: 5. fejezet).

#### 4. Magneto-optikai Kerr-effektus kísérletek

A spintronikai alkalmazások szempontjából ígéretes anyagok széles körét vizsgáltuk MOKE spektroszkópiával. Ez az eljárás számos paraméter meghatározására alkalmas a sáv szerkezet széles tartományában lévő elektronállapotokra, beleértve a Fermi energia közvetlen környezetét. Ilyen például a spin polarizáció foka, a spin polarizált elektronok pálya-állapota, lokalizált vagy itineráns jellege, az elektronok közötti mágneses kicserélődés és spin-pálya kölcsönhatás erőssége.

A spinell anyagcsaládba tartozó fémes mágnesről, a  $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$ -ről megmutattuk, hogy csekély elektron adalékolás hatására a vezetési elektronok 100%-ban spin polarizáltak lesznek. Ez az adalékolás várhatóan a Se atomok ~10-20%-nak Br, Cd vagy Zn atomokra való cseréjével megvalósítható.



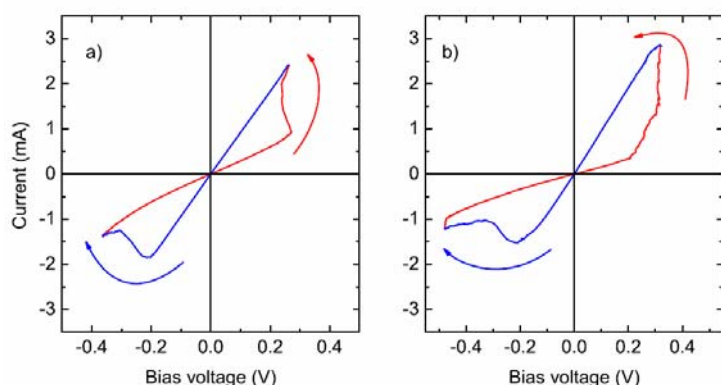
5. ábra

Bal panel: a  $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$  nem diagonális optikai vezetőképesség spektruma az infravörös-látható tartományon. Jobb panel: a nem diagonális és diagonális optikai vezetőképesség spektrumokból meghatározott spin függő állapotsűrűség a Fermi energia néhány eV-os környezetében.

A piroklór szerkezetű  $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ -ban és ennek elektron és lyuk adalékolt származékaiban vizsgáltuk az anomális Hall effektus szisztematikus növelésének lehetőségét a Fermi energia változtatásával. A nem diagonális optikai vezetőképességben (optikai Hall effektus) megfigyeltünk egy rezonanciát, melynek oka egy sávkeresztezési pont jelenléte a Fermi energia közelében. Ez a rezonancia a nem diagonális vezetőképesség spektrumában lyuk adalékolással alacsony energiák felé tolódik, ami az egyenáramú Hall vezetőképesség drasztikus megnövekedéséhez vezet.

## 5. Nanoméretű Ag-S memrisztor

Részletesen tanulmányoztuk az ionos vezetéstől származó ún. memrisztor jelenséget Ag-S felületi rétegen kialakított nanoméretű kontaktusokban. Megmutattuk, hogy a 3-5 nm mérettartományban kialakított *fém*s mintákban extrém nagy áramsűrűségnél rezisztív kapcsolási jelenség figyelhető meg. A kapcsolat jól meghatározott küszöbfeszültségnél lép fel, mértékét az átfolyt töltés határozza meg. Kontrollált mintaelőállítással olyan rendszert is létre tudunk hozni, amelyben szobahőmérsékleten és 4 K-en a jelenség ugyanolyan feszültség és áramskálán zajlik. Tudomásunk szerint ez az első fém<sup>s</sup> memrisztor az irodalomban, szemben a korábban publikált félvezető tulajdonságú ionos nano-kapcsolókkal.

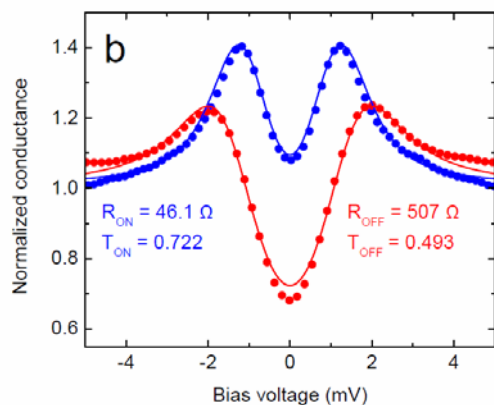


6. ábra

Ag-S ionos vezető tipikus feszültség-áram karakterisztikája 4.2 K-en (a.) és szobahőmérsékleten (b. panel).

A nyilak a körbejárási irányt jelzik (a pozitív feszültség az Ag elektródára vonatkozik).

A feszültség-áram karakterisztika önmagában nem ad információt arról, hogy a megfigyelt ellenállás egy nagy felületen megvalósuló kis áramsűrűséghez, vagy egy kisebb felületen átfolyó nagy áramsűrűséghez tartozik. Az általunk előállított minta fém<sup>s</sup> tulajdonsága azonban a cseppfolyós hélium hőmérsékleten végzett (szupravezető tüt alkalmazó) Andrejev spektroszkópia méréseket is lehető teszi, és a teljes spektrum kiértékelésével egymástól függetlenül meg lehet határozni a nanokontaktusra jellemző transzmissziót és a nyitott csatornák számát (Landauer-formalizmus).



7. ábra

A memrisztor jelenséget mutató Ag-S ionos kapcsoló két állapotában felvett Andrejev spektrum és az illesztett göbök paramétere.

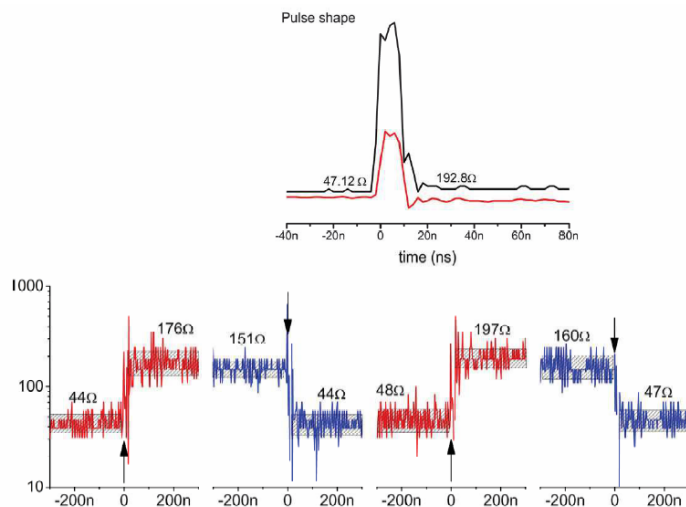
A kapcsolat több mint tízszeres ellenállás-változással jár, miközben a rendszerre jellemző transzmisszió keveset változik és mindkét állapotban igen magas értékkel rendelkezik: 72%, illetve 49%.

Az Andrejev kísérletek alapján meghatározott magas transzmissziós értékek igazolják, hogy közel ballisztikus vezetés valósul meg a mindössze  $\sim 3$  nm méretű kontaktusban. Ennél is fontosabb, hogy az akár egy nagyságrendet is felülmúló kapcsolásnál a „kikapcsolt” állapot is fémes marad, azaz a változás eredete nem a transzmisszió lecsökkenése, hanem a nyitott csatornák számának változása (a keresztmetszet csökkenése). A közel ballisztikus, nagy transzmissziójú viselkedés meghatározó szerepet játszik a folyamat dinamikájában is. A 8. ábrán látható szobahőmérsékletű kísérletekben megmutattuk, hogy a kapcsolási idő alsó határa 10 ns alatt van. Jelenlegi fejlesztéseinkkel – az instrumentális időkorlát csökkentésével – a kapcsoló nagyfrekvenciális viselkedésének tanulmányozását készítjük elő.

#### 8. ábra

A felső panel egy 10 ns-os pulzussal kiváltott kapcsolás feszültség- és áram-jelének időbeli lefutását mutatja.

Az alsó panelen alternáló előjelű impulzusokkal kiváltott kapcsolások sorozata látszik.



A legújabb memrisztor kísérletek eredményeit tartalmazó összefoglaló cikkünk kézírata letölthető a <http://dept.phy.bme.hu/NK72916/> internet címről.

#### **Áttételes hatások:**

A projekt során a vizsgálati lehetőségeket bővítő olyan lényeges műszerfejlesztések valósultak meg, mint például a precíziós piezomozgatás megvalósítása, az alacsony zajú méréstechnika kiépítése, a magneto-optikai detektálás fejlesztése. Ezek a projekt témáin túlmutató kísérleti kutatások laboratóriumi háttérét is biztosítják.

A projekt keretében végzett kutatások az alábbi PhD értekezések készítéséhez járultak hozzá:

Bordács Sádor – *summa cum laude*, 2011

Geresdi Attila – *summa cum laude*, 2011

Makk Péter – *summa cum laude*, 2012

Az teljes értekezések (továbbá a tézisfüzetek és a rövid kivonatok) megtekinthetők a BME Fizikai Tudományok Doktori Iskola honlapján: <http://dept.phy.bme.hu/phd/>