

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRATISLAVE FAKULTA ELETROTECHNIKY A  
INFORMATIKY

**Ing. Norbert Gál**

**Príprava a charakterizácia heteroštruktúr  
supravodič-feromagnetikum-supravodič**

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie akademického titulu:  
Philosophiae Doctor („PhD.“)  
v doktorandskom študijnom programe:  
5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo

Bratislava 2019



Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Elektrotechnickom ústave, Slovenskej akadémie vied v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Norbert Gál  
Elektrotechnický ústav SAV  
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Školiteľ: RNDr. Vladimír Štrbík, CSc.  
Elektrotechnický ústav SAV  
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Oponenti: prof. RNDr. Marián Reiffers, DrSc.  
Prešovská univerzita v Prešove  
Fakulta humanitných a prírodných vied  
17 novembra č. 1, 081 16 Prešov, Slovakia

doc. Ing. Maroš Gregor PhD.  
Fakulta matemat., fyziky a inform. UK  
Mlynská dolina F1  
842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozposlaný:..... 26.7.2019 .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: ..16.8.2019... o ...10:00... hod.

na: ..... ELU SAV .....

pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia  
vymenovanou dňa ..... 22.7.2019 ..... predsedom spoločnej odborovej  
komisie vo vednom odbore 5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo

Predseda spoločnej odborovej komisie:  
Prof. Ing. Július Cirák, CSc.  
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva  
FEI STU 812 19 Bratislava



# Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>2</b>
<b>Efekty na rozhraní supravodič-feromagnet.....</b>	<b>3</b>
Dlhodosahový jav blízkosti .....	4
<b>Výsledky a diskusia .....</b>	<b>7</b>
Príprava vrstiev a nanospojov .....	7
Štruktúrna analýza vrstiev LSMO, YBCO a dvojvrstiev LSMO/YBCO .....	11
Elektrické a magnetické merania LSMO, YBCO vrstiev, LSMO/YBCO dvojvrstiev, LSMO/YBCO mikro- a nanopásikov a S/F/S nanospojov .....	16
Rozhranie LSMO/YBCO .....	25
Simulačné výpočty anomálnych teplotnej závislosti odporu N/S/F/S/N .....	27
Simulačný model .....	28
„Negatívny odpor“ .....	32
<b>Prezentácia výsledkov .....</b>	<b>34</b>
Publikácie .....	34
Citácie .....	35
Medzinárodné konferencie .....	35
<b>Použitá literatúra .....</b>	<b>37</b>

# Úvod

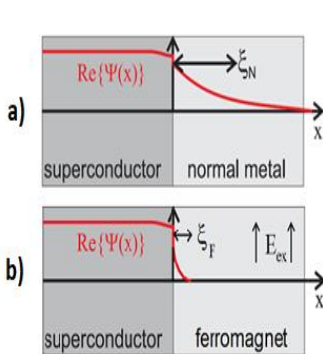
Tenkovrstvové heteroštruktúry supravodič-feromagnet-supravodič (S/F/S) sú veľmi zaujímavé z hľadiska študovania tripletnej supravodivosti. V štruktúrach supravodič-izolant-supravodič môže tiecť supravodivý prúd, ak dielektrická bariéra je dostatočne tenká ( $\lesssim 3$  nm alebo menej) a vlnové funkcie dvoch supravodičov v dielektriku sa navzájom prekrývajú. V prípade štruktúr supravodič-normálny kov-supravodič môžu supravodiče interagovať cez normálny kov až na vzdialenosť niekoľkých mikrometrov ((jav blízkosti – proximity effect). V prípade heteroštruktúr S/F/S táto „dĺžka“ je oveľa menšia ( $\sim$  nm), avšak existujú teórie, kde v dôsledku konverzie Cooperových párov (CP) na tripletné páry charakteristická dĺžka javu blízkosti môže výrazne narastať tiež na vzdialenosti niekoľko sto nm (long range proximity effect, LRPE). Pre vytvorenie konverzie CP zo singletných (spiny  $\uparrow\downarrow$ ) na tripletné CP (spiny  $\uparrow\uparrow$ ) je potrebná existencia magnetickej nehomogenity vo vrstve  $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3$  (LSMO) pod  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) vrstiev.

V tejto práci je prezentovaná príprava a štúdium proximitných efektov na supravodivých tenkovrstvových heteroštruktúrach YBCO/LSMO/YBCO nanometrových rozmerov tvarovaných pomocou  $\text{Ga}^+$  fokusovaného iónového zväzku (FIB).

# Efekty na rozhraní supravodič-feromagnet

Na začiatku objavu supravodivosti sa zistilo, že aj veľmi malé magnetické pole môže zničiť supravodivý stav, čo viedlo k záveru, že supravodivosť a magnetizmus nemôžu existovať v jednom materiáli. Tento predpoklad posilnila aj BCS teória, podľa ktorej základným nosičom náboja sú CP zložené z dvojice elektrónov s opačnými spinmi. Výmenná väzba vo feromagnetikách orientuje magnetické momenty, teda aj spiny do jedného smeru.

Od polovice 60-tych rokov sa začali objavovať práce [1], [2], kde naznačili teoreticky, že supravodivosť a feromagnetizmus môžu koexistovať v dôsledku priestorovej modulácie vlnovej funkcie párov na rozhraní S a F materiálu. Neskôr boli objavené materiály, ktoré tento predpoklad potvrdili a vykazujú supravodivý stav napriek prítomnosti magnetických iónov alebo feromagnetickým vlastnostiam ako:  $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$ ,  $\text{Uge}_2$ ,  $\text{UrhGe}$  [3], [4]. Obsiahly prehľad vo fyzike koexistencie supravodivosti a feromagnetizmu v týchto látkach podal Maple [5]. Na rozhraní S/F vzniká celý rad efektov zaujímavých tak z hľadiska bádateľského, ako aj z hľadiska aplikačného. Jedným z nich je jav blízkosti, ktorý je známy v prípade rozhrania nízkoteplotného supravodiča (NTS) a normálny kov (N), kde Cooperové páry prenikajú do N materiálu (obr. 1. a) na vzdialenosť  $\xi_N$  určenú ako  $\xi_N = \hbar v_N / k_B T$  v prípade  $\xi_0 \ll l_N$  (čistý kov), kde  $\hbar$  je Plankova konštanta,  $v_N$  Fermiho rýchlosť v normálnom kove,  $\xi_0$  rozmer CP,  $l_N$  stredná voľná dráha nosičov v kove, alebo  $\xi_N = \sqrt{(\hbar v_N l_N / 6\pi k_B T)}$  v prípade  $\xi_0 \gg l_N$  (znečistený



1. OBR. ROZHRAŇIE NTS/N  
 A NORMÁLNÝ KOV (a), NTS  
 A FEROMAGNET (b) [6]

malá  $\xi_F \sim 1 \text{ nm}$  (Obr. 1. b).

kov). V reálnych štruktúrach NTS/N  $\xi_N$  dosahuje hodnoty až do  $1 \mu\text{m}$ .

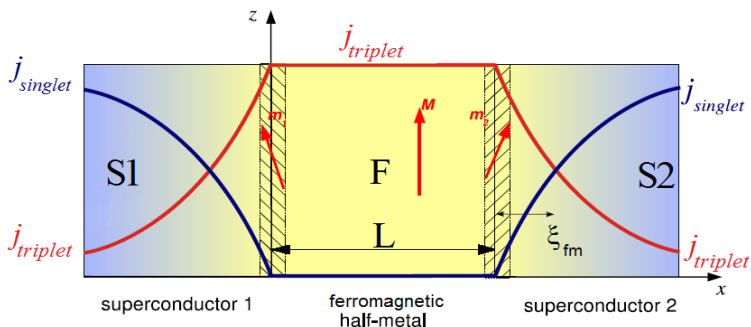
V prípade rozhrania vysokoteplotného supravodiča (VTS) a feromagnetika v dôsledku, že materiály vykazujúce gigantickú magnetorezistenciu (GMR) majú pomerne veľkú energiu výmennej väzby  $E_{\text{ex}} \approx 3 \text{ eV}$ , spárované nosiče náboja materiálu S sú po vstupe do F rozbíjané (ich energia väzby je na úrovni  $\lesssim 50\text{-}60 \text{ meV}$ ), preto ich charakteristická prieniková dĺžka je

## Dlhodosahový jav blízkosti

Základnú teóriu supravodivosti vo feromagnetikách vypracovali Bergeret, Volkov a Efetov [7], podľa ktorej Cooperové páry (majú spinový singletný stav  $S = 0$ ,  $\uparrow\downarrow$ ) môžu konvertovať na spinovo zorientované  $\uparrow\uparrow$  tripletné Cooperové páry, ktoré môžu koexistovať s magnetickým poľom ako Zeemanova interakcia, čím sa stáva energeticky kompatibilný s feromagnetizmom a rozpadáva na vzdialenosti odpovedajúcej koherenčnej dĺžky  $\xi_N \approx 1 \mu\text{m}$ , t.j. hĺbka vniku singletnej supravodivosti do normálneho kovu [8], [9].



Tento poznatok podnietil záujem o rôzne S/F a S/F/S štruktúry s možnosťami spinového transportu. Oblasť využitia týchto javov sa označuje ako supravodivá spintronika. Spintronika ponúka nový potenciál výroby súčiastok a obvodov, v ktorých spinovými prúdmi riadené logické operácie môžu byť rýchlejšie s rádovo vyššou energetickou účinnosťou ako ekvivalentné

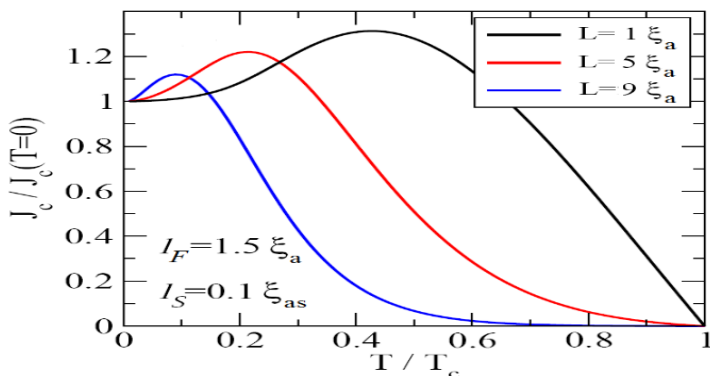


2. OBR. S/F/S SPOJ SO ZNÁZORNENÝMI ZLOŽKAMI SUPRAVODIVÉHO PRÚDU  $J_{SINGLET}$  A  $J_{TRIPLET}$  [10]

polovodičové obvody pracujúce s nábojmi. Na rozhraní S1/F (obr. 2.) v dôsledku magnetickej nehomogenity (šrafované) vzniká tripletná komponenta (Cooperove páry so súhlasne orientovanými spinmi  $\uparrow\uparrow$ ,  $\downarrow\downarrow$ ) supravodivého prúdu konvertovaním zo singletnej (Cooperove páry so spinmi  $\uparrow\downarrow$ ) formy supravodiča S1. Zatiaľ čo tripletná zložka môže preniknúť celým F materiálom na dĺžke  $L$ , singletná je blokováná, pričom platí, že suma prúdov tripletnej a singletnej zložky je konštantná, spĺňajúca rovnicu continuity. Na rozhraní F/S2 tripletná zložka opäť konvertuje na singletovú, ktorá zabezpečuje transport v S2.

Najdôležitejším dôkazom takéhoto spoja je teplotná závislosť kritického prúdu  $I_c(T)$ , ktorá vykazuje nemonotónny priebeh s maximum pri určitej teplote (obr. 3.).

Supravodič YBCO a feromagnet LSMO má svoje supravodivé a feromagnetické vlastnosti vyvolané hlavne dopujúcimi prvkami, kuprátové VTS kyslíkom a GMR manganity dvojvalentným Sr, Ca, Ba prvkami. Dopanty vyvolávajú zmiešanú valenciu  $\text{Cu}^{3+}$  a  $\text{Cu}^{2+}$  iónov pri kuprátoch a iónov  $\text{Mn}^{4+}$  -  $\text{Mn}^{3+}$  pri manganitoch.



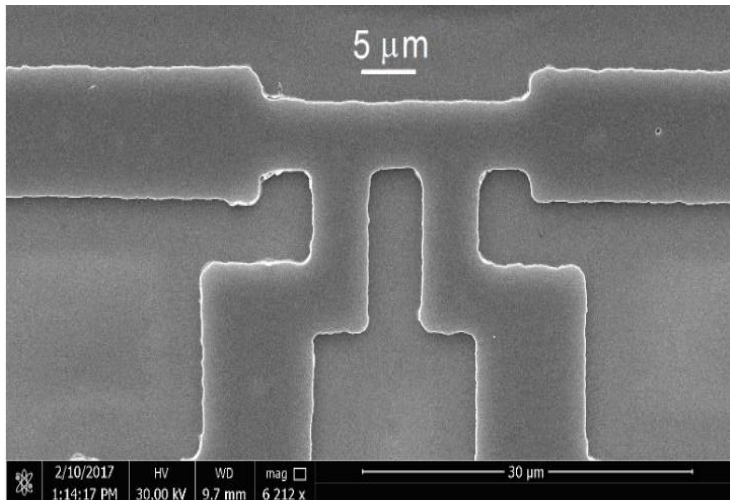
3. OBR. TEORETICKÉ TEPLTNÉ ZÁVISLOSTI KRITICKÉHO PRÚDU S/F/S SPOJA PRE RÔZNE CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRE S A F [10]

Ich pomer je veľmi dôležitý z hľadiska supravodivých a feromagnetických vlastností daných materiálov. V prípade vzájomného kontaktu (napr. S/F/S štruktúry) existovanejšie ióny  $\text{Cu}^{3+}$  a  $\text{Mn}^{4+}$  majú možnosť svoj stav zmeniť v dôsledku prestupu elektrónov z druhého materiálu, čo vedie k zmene iónových stavov na oboch stranách rozhrania. Oba materiály boli pripravené (dopované) na najoptimálnejší stav (najvyššia  $T_c$  a  $T_{\text{curie}}$ ), ale zmena pomerov iónov  $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$  a  $\text{Mn}^{4+}/\text{Mn}^{3+}$  v blízkosti rozhrania vedie k degradácii supravodivých a feromagnetických parametrov. Niektorí autori odhadujú hrúbku oblastí zmenených parametrov VTS a GMR na menšiu ako 1 nm [11] iní 10 – 20 nm [12].

# Výsledky a diskusia

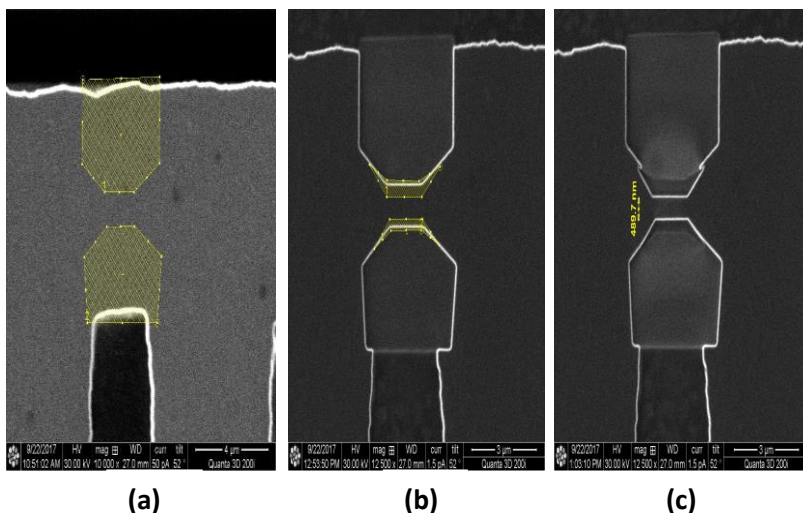
## Príprava vrstiev a nanospojov

Vrstvy LSMO a YBCO a dvojrvtvy LSMO/YBCO boli pripravené na podložkách STO (mriežkové neprispôsobenie na úrovni 0,75%) pomocou pulznej laserovej depozície - PLD. Typické hrúbky LSMO vrstiev boli asi 30 nm a YBCO asi 70 nm. V iných depozičných zariadeniach na dvojrvtvu boli nanosené ochranné vrstvy Au (50nm) a Ti (50nm) metódou magnetronového naprašovania. Úlohou týchto vrstiev bola ochrana supravodivej a feromagnetickkej vrstvy pred degradačnými účinkami ďalších technologických procesov.



4. OBR. DETAIL MIKROMOSTÍKA ŠTVORVRSTVY Tí/Au/YBCO/LSMO 5x5 μm<sup>2</sup> PO VYLEPTANÍ METÓDOU IBE

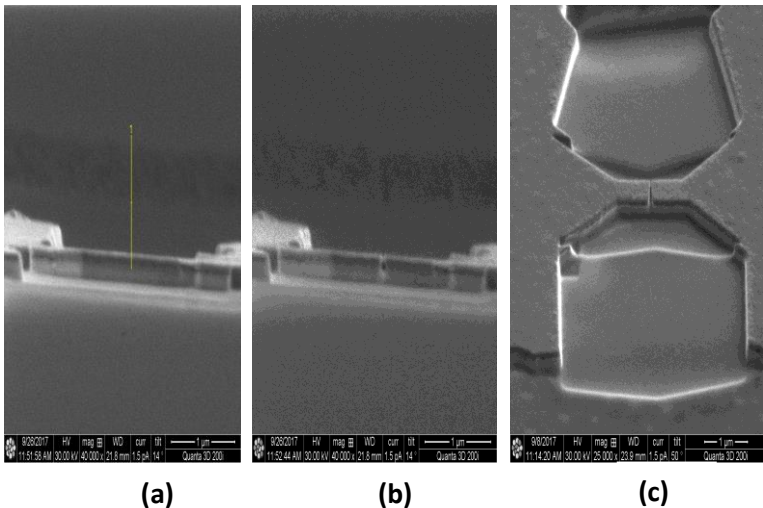
Následným leptaním s urýchlenými  $\text{Ar}^+$  iónmi (IBE – Ion Beam Etching), boli vytvarované mikromostíky štvorvrstvy  $\text{Ti}/\text{Au}/\text{YBCO}/\text{LSMO}$  rozmerov približne  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  (obr. 4.). V ďalšom kroku boli dvojstupňovo pomocou  $\text{Ga}^+$  iónov fokusovaného iónového zväzku (FIB) tvarované z mikromostíkov nanomostíky štvorvrstvy rozmerov šírka asi 300-500 nm, dĺžka 1500 nm (obr. 5.).



5. OBR. TVAROVANIE NANOMOSTÍKA FIBOM. LEPTANIE VÄČŠÍCH PLŔCH MIKROMOSTÍKA (VYZNAČENÝCH ŽLTOU FARBOU) ENERGETICKEJŠÍM REŽIMOM (a), TVAROVANIE NANOMOSTÍKA (b), VÝSLEDNÝ NANOMOSTÍK (c).

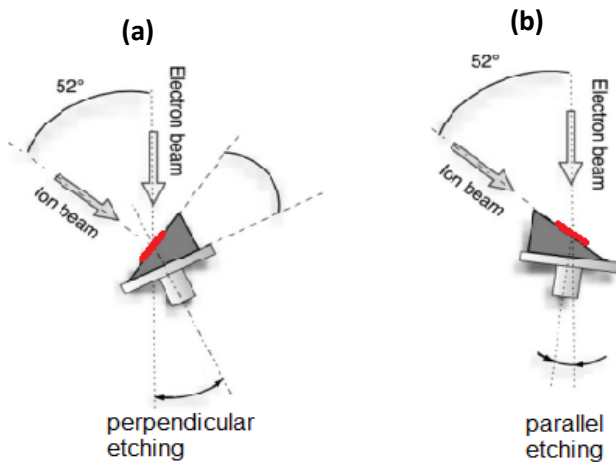
Posledným krokom v príprave S/F/S nanospojov je vytvorenie zárezu o dĺžke  $L \sim 20\text{-}1000$  nm cez vrstvy  $\text{Ti}$ ,  $\text{Au}$  a  $\text{YBCO}$  (Obr. 6.), pričom  $\text{LSMO}$  pod zárezom by malo zostať nezdegradované. Zárez sme robili pomocou  $\text{Ga}^+$  iónov v dvoch režimoch:

- Kolmý režim – lepšie ovládanie procesu (nastavenie rýchlosti a presnosti leptania). Nevýhodou je dopad  $\text{Ga}^+$  iónov na vrstvu LSMO, kedy je degradácia vlastnosti najväčšia. Leptací čas sme stanovili počas leptania pomocou priebehu leptacieho prúdu (obr 7. a, a obr. 8.).
- Paralelný režim – v tomto režime je veľmi sťažená orientácia na vzorke, vizuálneho hľadania rozhrania YBCO/LSMO v nanomostíku. Proces leptania zárezu do nanomostíka je pomerne rýchly (10 - 15 s) a ťažšie kontrolovaný (obr 7. b).

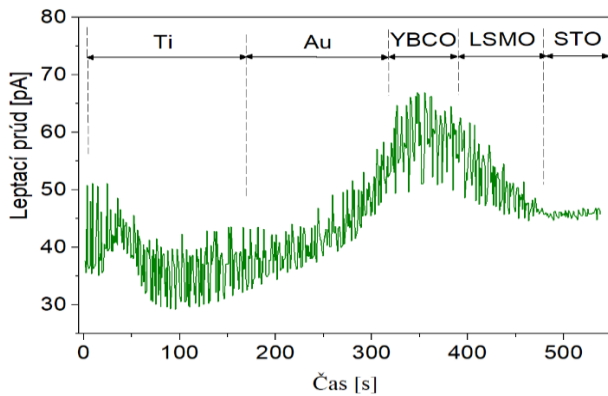


6. OBR. PROCES LEPTANIA ZÁREZU DO NANOMOSTÍKA PARALELNÝM ZVÄZKOM  $\text{Ga}^+$  IÓNOV. ZAMERANIE ZÁREZU (a), PO VYLEPTANÍ (b), NÁHLED NA S/F/S NANOSPOJ POD UHLOM ASI  $50^\circ$  (c).

Napriek spomenutým ťažkostiam, paralelný režim prípravy S/F/S sme častejšie volili kvôli výrazne nižšej degradácii zostatkovej LSMO vrstvy, kde sme očakávali výskyt LRPE.



7. OBR. LEPTANIE S/F/S NANOSPOJA IÓNOVÝM LÚČOM S KOLMÝM (a) ALEBO PARALELNÝM DOPADOM (b) K POVRCHU VRSTVY.

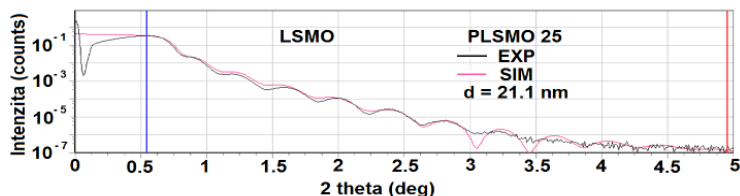


8. OBR. PRIEBEH LEPTACIEHO PRÚDU POČAS LEPTANIA KOLMÝM  $\text{Ga}^+$  IÓNOVÝM ZVÄZKOM S PRIBLIŽNE VYZNAČENÝMI ČASOVÝMI ÚSEKMI LEPTANIA JEDNOTLIVÝCH VRSTIEV.

# Štruktúrna analýza vrstiev LSMO, YBCO a dvojvrstiev LSMO/YBCO

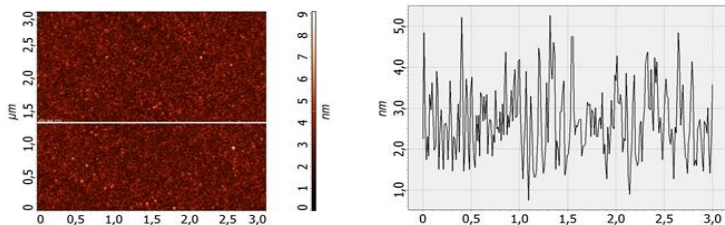
## LSMO

Ako vyplýva aj z modelu S/F/S spoja je potrebné, aby spodná LSMO vrstva bola homogénna, hladká a rovnakej hrúbky. Naše RTG meranie (RTG reflektivita) sólo LSMO vrstvy tieto vlastnosti potvrdzujú. Simulačný výpočet interferencie RTG žiarenia [13] pre LSMO vrstvu 21.1 nm hrubú (obr. 9. červená čiara) veľmi dobre odpovedá experimentálnemu priebehu (obr. 9. čierna čiara).



9. OBR. NÍZKO UHLOVÉ RTG MERANIE (RTG REFLEKTIVITA) SÓLO LSMO VRSTVY NA STO PODLOŽKE

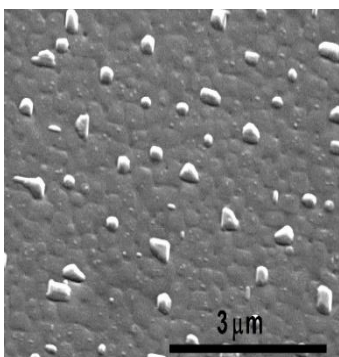
Povrchovú morfológiu sme vyšetrili pomocou skenovacím elektrónovým mikroskopom (SEM) a atómovým silovým mikroskopom (AFM). Na SEM fotkách nebolo vidieť žiadne



10. OBR. ZOSNÍMANÝ POVRCH LSMO VRSTVY NA PLOCHE  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$  (VEAVO) A RELIÉF POVRCHU POZDĹŽ BIELEJ ČIARY (VPRAVO)

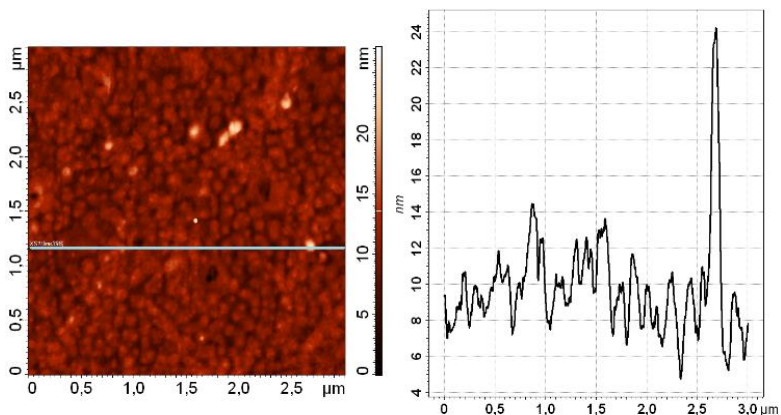
rastové defekty (pórovitosť, výstupky, zrná, a pod.), na AFM obrázkoch vidieť nerovnosti povrchu na úrovni 1-2 nm (obr. 10.). Charakteristická veličina nerovnosti povrchu RMS (Root Mean Square) je 0.86 nm [14].

## YBCO



12. OBR. POVRCHOVÁ MORFOLÓGIA YBCO VRSTVY

Najčastejšie defekty YBCO vrstiev boli výrastky, zrn zle zreagovaného materiálu  $BaCuO_3$  alebo  $CuO_x$  zrná (obr. 11.). AFM analýza takýchto vrstiev vykazuje zvýšenú nerovnosť povrchu (obr. 12.) ale prevážná časť povrchu tvorí dobre zreagované YBCO (RMS = 1.94 nm). Príčina vzniku výrastkov na povrchu YBCO vrstiev nebola



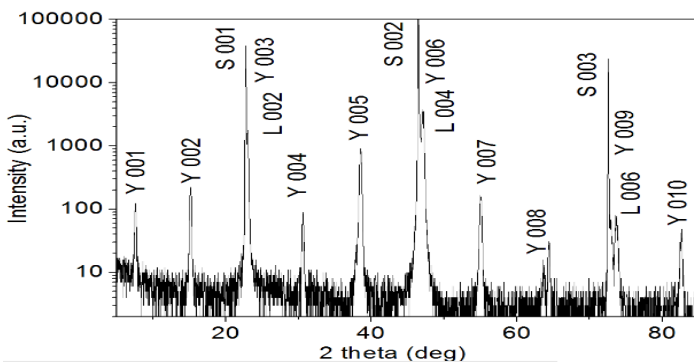
11. OBR. ZOSNIMANÝ POVRCH YBCO VRSTVY NA PLOCHE  $3 \times 3 \mu m^2$  (VĽAVO) A RELIEF POVRCHU POZDĹŽ BIELEJ ČIARY (VPRAVO)



objasnená a ani odstránená. Zvýšená drsnosť povrchu YBCO by však nemala vplývať na efekty dlhodobého proximálneho efektu v S/F/S štruktúrach.

## LSMO/YBCO

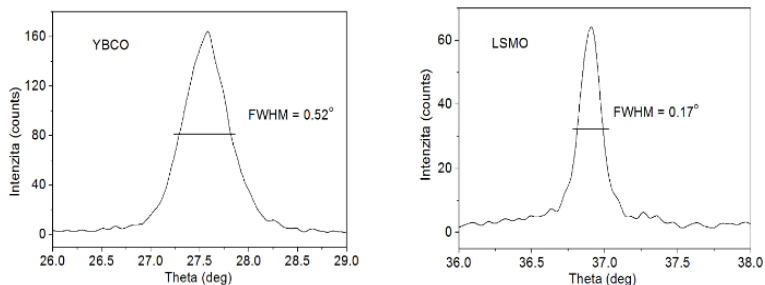
RTG-záznam  $\theta$ - $2\theta$  skenu (obr. 13.) dvojvrstvy LSMO/YBCO ukazuje c-orientovaný rast LSMO a YBCO vrstiev na STO podložke. Z grafu môžeme určiť mriežkový parameter elementárnej bunky ktoré sú pre LSMO  $c = 0,39$  nm a pre YBCO  $c = 1,16$  nm.



13. OBR. RTG ZÁZNAM  $\theta$ - $2\theta$  SKENU DVOJVRSTVY LSMO/YBCO

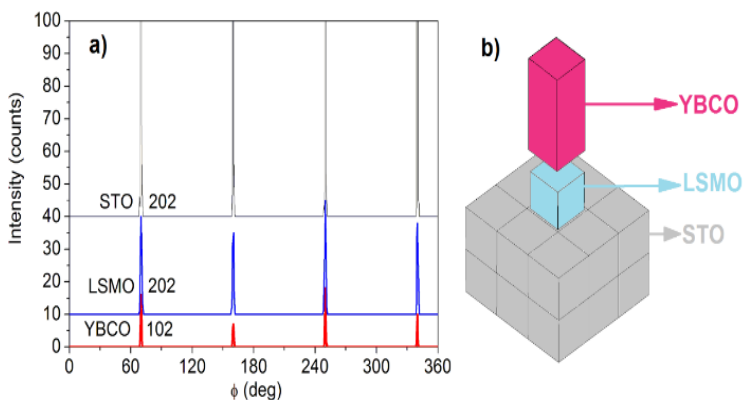
Rovinnosť vrstiev sme vyšetrovali pomocou tzv.  $\omega$ -skenu. Šírka krivky v polovici výšky maxima FWHM (Full Width at Half Maximum) je pre LSMO =  $0.17^\circ$  a pre YBCO  $\sim 0.52^\circ$  (obr. 14.) ukazuje kvalitný rast vrstvy.

Informácie o raste v horizontálnom smere (v rovine vrstvy) nám poskytuje  $\phi$ -skenu. Ak sa píky vrstvy prekrývajú s píkami od podložky hovoríme o epitaxnom raste vrstvy. Z obrázku 15. môžeme konštatovať, že vrstvy LSMO a YBCO rastu na podložke STO epitaxne.

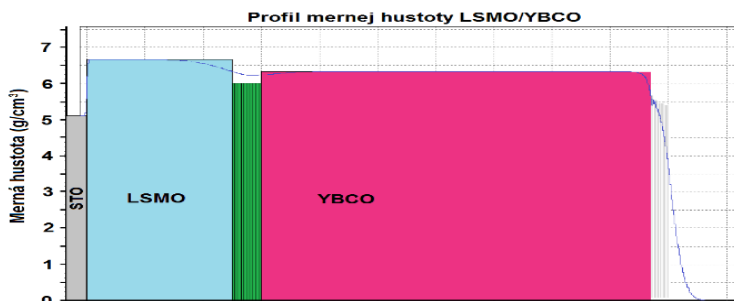


14. OBR.  $\omega$  PRE YBCO A LSMO VRSTVY, POROVNÁCIEM PARAMETROM ROVINNOSTI JE ŠÍRKA KRIVKY V POLOVICI VÝŠKY MAXIMA FWHM (FULL WIDTH AT HALF MAXIMUM)

Nízkoúhlové meranie dvojvrstvy LSMO/YBCO so simulačným výpočtom naznačila že medzi vrstvami LSMO a YBCO musíme rátať s nejakou medzivrstvou (obr. 16.). Jej hrúbka je 5 nm a merná hustota len o málo menšia ako merné hustoty LSMO alebo YBCO. Simulácia zloženie, kryštalickú štruktúru alebo či sa jedná o interdifúziu nevie konkretizovať.

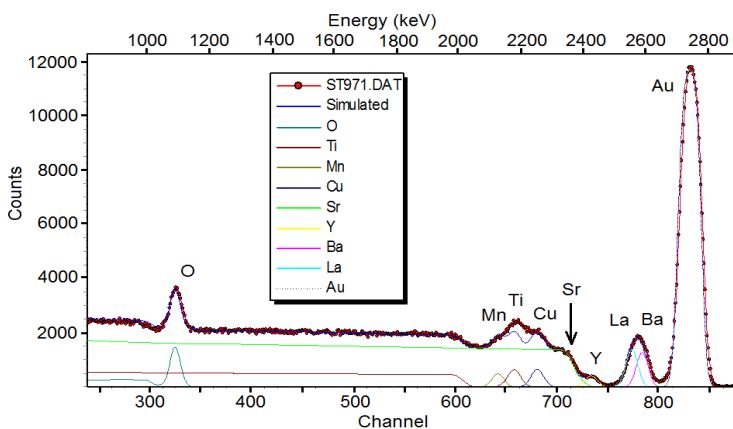


15. OBR.  $\phi$  DVOJVRSTVY LSMO/YBCO NA PODLOŽKE STO (a) A SCHÉMATICKÉ ZOBRAZENIE RASTU „KOCKA NA KOCKU“ VRSTVIEV LSMO A YBCO NA STO (b).



16. OBR. PROFIL MERNEJ HUSTOTY DVOJVRSTVY LSMO/YBCO

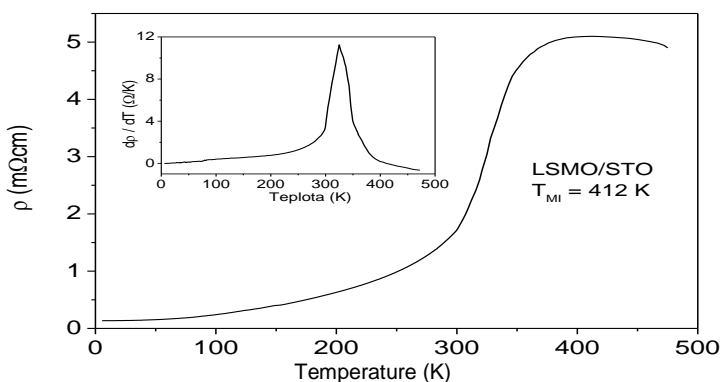
Analýza dvojrstvy urobená metódou RBS (Rutherford backscattering spectrometry – obr. 17.) ukázala, že zloženie jednotlivých vrstiev je blízke k nominálnemu t.j.  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  a rovnako aj pre vysokoteplotný supravodič  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.79}$ . Informácie o vrstve medzi LSMO a YBCO kvôli jej malej hrúbke metóda nevie poskytnúť.



17. OBR. ANALÝZA DVOJVRSTVY UROBENÁ METÓDOU RBS (RUTHERFORD BACKSCATTERING SPECTROMETRY)

Elektrické a magnetické merania LSMO, YBCO vrstiev, LSMO/YBCO dvojvrstiev, LSMO/YBCO mikro- a nanopásikov a S/F/S nanospojov

## LSMO



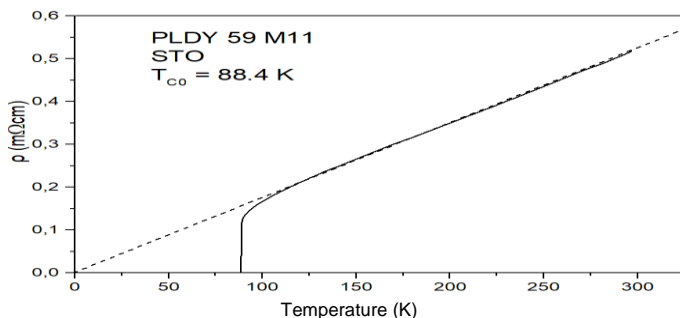
18. OBR. ZÁVISLOSŤ ŠPECIFICKÉHO ODPORU 35 nm HRUBEJ EPITAXNEJ LSMO VRSTVY OD TEPLoty. VSUNUTÝ OBRÁZOK UKAZUJE TEPLotNÚ DERIVÁCIU ŠPECIFICKÉHO ODPORU S MAXIMOM PRI TEPLOTE 325 K.

Charakteristická teplotná závislosť LSMO vrstvy pozostáva z niekoľkých častí. Pri najnižších teplotách ( $T < 50 K$ ) špecifický odpor vrstvy je konštantný ( $\rho_0 \approx 0.1 m\Omega cm$ ) a určený najmä nečistotami a kryštalickými defektami. Pre vyššie teploty uplatňuje transport elektrón-elektrónového rozptylu ( $\rho \sim T^2$ ). Teplotnú oblasť  $220 K > T > 360 K$  charakterizuje prudký nárast odporu ( $\rho \sim T^{4.5}$ ) odpovedá elektrón-magnónovej interakcii, ktorou sa popisajú feromagnetické vlastnosti manganitov [15], [16]. Na obrázku 18. je prezentovaná teplotná závislosť, 50nm hrubej, vysokokvalitnej LSMO vrstvy.

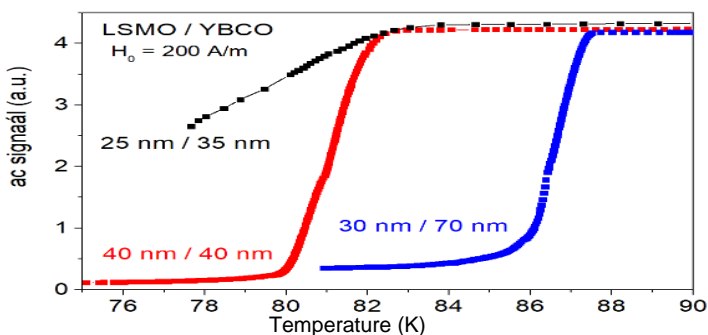
## YBCO

Elektrické parametre sólo YBCO vrstiev na STO dosahujú hodnôt vysokého štandardu (Obr. 19.). V oblasti  $100\text{ K} < T < 300\text{ K}$  teplotná závislosť odporu prezentuje závislosť ideálneho kovu. Pomer odporov  $\rho_{300\text{K}} / \rho_{100\text{K}} = 3$  a supravodivý prechod pri teplote  $T_{\text{c}0} = 88.4\text{ K}$  hovorí a vysokokvalitnej vrstve.

## LSMO/YBCO

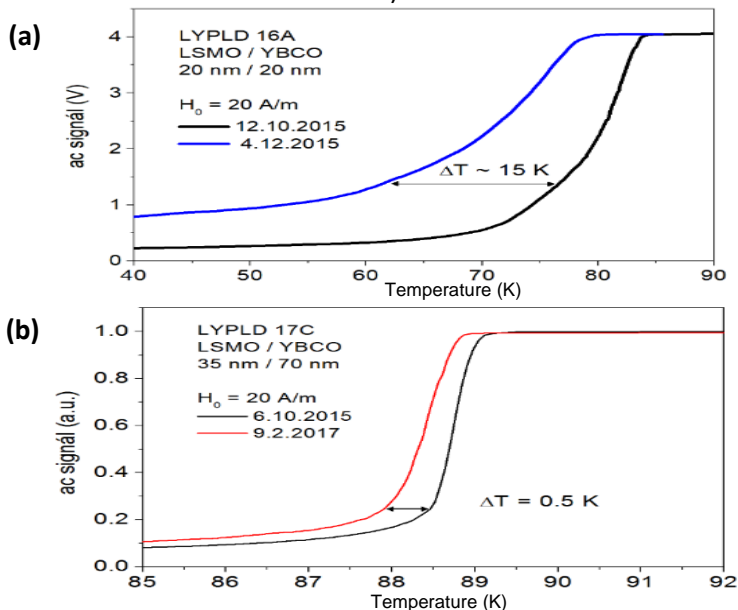


19. OBR. TEPLOTNÁ ZÁVISLOSŤ ŠPECIFICKÉHO ODPORU 70 nm HRUBEJ YBCO VRSTVY NA PODŁOŽKE STO.



20. OBR. SUPRAVODIVÝ PRECHOD DVOJVRSTVY V ZÁVISLOSTI OD TEPLOTY PRE RÔZNE VARIÁCIE HRÚBOK LSMO A YBCO VRSTVIEV.

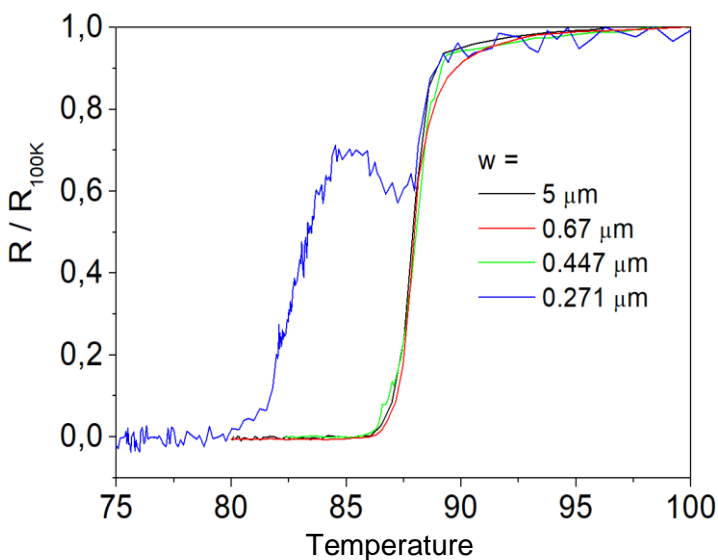
Pri výbere hrúbok LSMO/YBCO dvojvrstvy sme brali do úvahy aby supravodivý prechod bol dostatočne kvalitný a jeho kritická teplota bola blízko k štandardu YBCO vrstvy, ktorý sa mal zachovať počas celého života čipu (6 - 12 mesiacov) a v prípade preleptania rozhrania LSMO/YBCO v S/F/S nanoštruktúre zostalo LSMO hrubé aspoň 20nm. Na obr. 20. je vidieť, že najkvalitnejší supravodivý prechod sme dostali v prípade kombinácie hrúbok 30nm LSMO a 70nm YBCO, časová stabilita pri tejto kombinácii bola najlepšia (pokles supravodivosti len o 0.5 K za 16 mesiacov – obr. 21.).



21. OBR. POKLES TEPLoty SUPRAVODIVÉHO PRECHODU V PRÍPADE TENKEJ YBCO VRSTVY ZA NECELÉ DVA MesiACE (a) A PRÍPADE HRUBEJ VRSTVY YBCO ZA 16 MesiACOV (b).

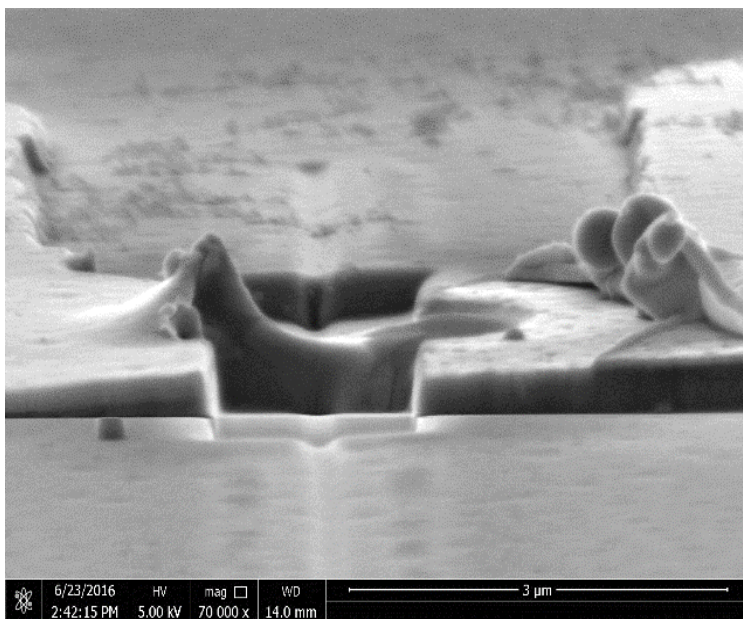
Po vytvarovaní mikromostíkovej štruktúry ( $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ) sa neukázala žiadna degradácia supravodivých vlastností.

Z priebehov odporového prechodu nanomostíkovej štruktúry LSMO/YBCO/Au/Ti do supravodivého stavu (obr. 22.) vidno, že pre šírky mostíkov  $w \geq 500 \text{ nm}$  nedochádza k potlačeniu kritickej teploty YBCO, preto sme volili šírku našich S/F/S štruktúr na asi 500 nm.



22. OBR. PRECHOD DO SUPRAVODIVÉHO STAVU MOSTÍKOVEJ ŠTVORVRSTVY LSMO/YBCO/AU/TI PRE RÔZNE ŠÍRKY MOSTÍKA.

Posledným, najnáročnejším krokom prípravy S/F/S nanospoja bola prerezanie vrstiev Ti, Au a YBCO na veľmi malú vzdialenosť 20 – 1000 nm pomocou  $\text{Ga}^+$  iónového zväzku. Problémom je nastavenie leptania presne na rozhranie LSMO/YBCO

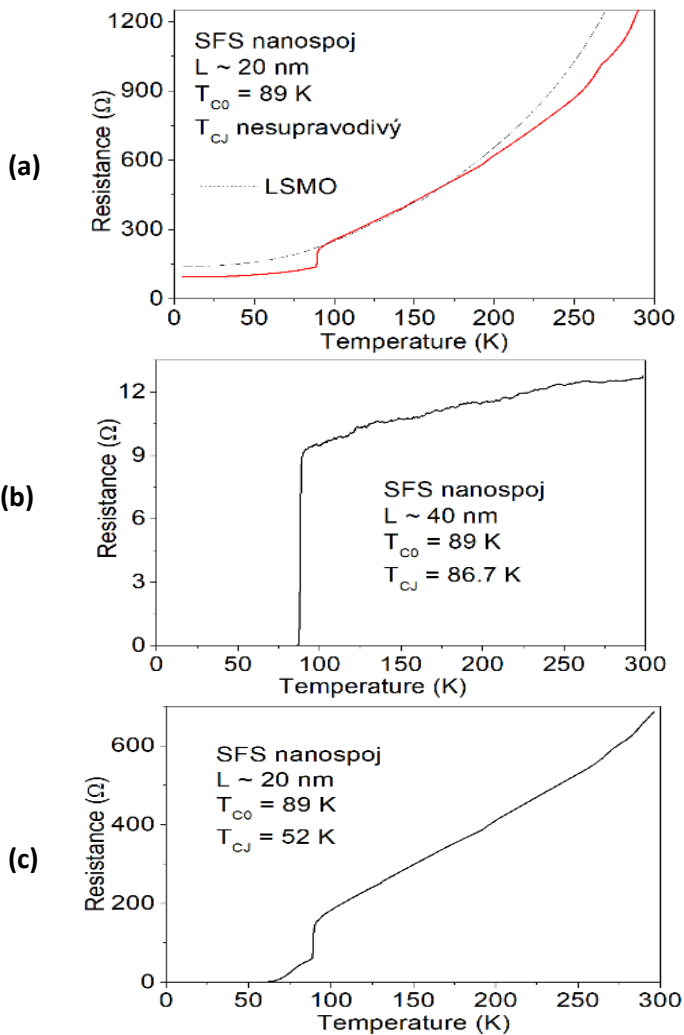


23. OBR. S/F/S NANOSPOJ PO PRIERAZE ELEKTROSTATICKÝM VÝBOJOM RESP. PRÚDOVÝM PŘEŽÁŽENÍM

a pomerne vysoká energia zväzku na malý objem leptania ( $20 \times 170 \times 500 \text{ nm}^3$ ), ale aj okolnosť, že jedným rozmerom rezu približujeme k praktickej šrke iónového zväzu FIBu  $\sim 5 \text{ nm}$ .

Takto vytvarované nanopásiky a nanospoje boli extremne citlivé na elektrostatické prierazy (obr. 23. – deštrukcia nanopásika). Na S/F/S nanopásikoch sme pozorovali tri charakteristické R(T) závislosti (obr.24.):





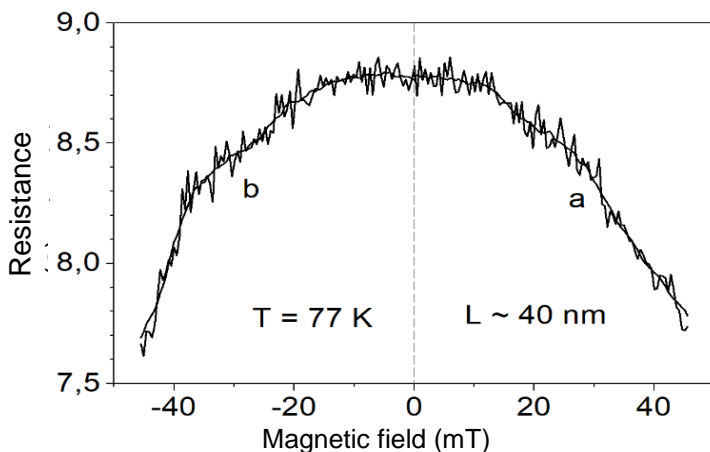
24. OBR. TRI CHARAKTERISTICKÉ TYPY  $R(T)$  ZÁVISLOSTÍ S/F/S NANOSPOJOV. NESUPRAVODIVÝ (a), BEZ POTLAČENIA SUPRAVODIVOSTI (b) A S ČIASTOČNE POTLAČENOU SUPRAVODIVOSŤOU (c).

## 1. S/F/S nanospoj nebol supravodivý (obr. 24. a):

$R(T)$  charakteristiky S/F/S nanospoja pripomína teplotnú závislosť odporu vrstvy LSMO. Je viditeľný pokles odporu S/F/S pri teplote prechodu vrstvy YBCO do supravodivého stavu, čo znamená že pre  $T < 90$  K meriame iba úsek LSMO v záreze S/F/S štruktúry. Výpočet špecifického odporu LSMO vrstvy v záreze S/F/S nanospoja však vykazuje výrazné zvýšenie jeho hodnoty o viac ako dva rády ( $\rho_0 \approx 20$  m $\Omega$ cm), čo naznačuje značnú degradáciu vlastností LSMO vrstvy pri leptaní zárezu FIBom.

Z literatúry sú známe prípady, keď z úbytku odporu feromagnetického materiálu medzi supravodivými elektródami posudzovali dlhodosahový efekt blízkosti [8], [17]. V našom prípade sme používali magnetické pole v kolmom smere na štruktúru ako jednu z možností ako vytvorenia magnetickej nehomogenity na rozhraní S/F (kolmá magnetizácia LSMO v drážke S/F/S nanospoja, paralelná pod YBCO). Magnetická nehomogenita má uľahčiť konverziu singletných Cooperových párov v S na tripletné v F a tripletné páry majú znížiť hodnotu odporu feromagnetika.

Priebeh závislosti ukazuje (obr. 25), že aj malé magnetické pole (- 45 mT < B < 45 mT) zníži odpor feromagnetickkej časti S/F/S nanospoja asi o 13%, čo odpovedá zmene dĺžky spoja  $\Delta L \approx 5.2$  nm. Táto dĺžka je výrazne väčšia ako hĺbka vniku singletových CP do feromagnetika  $\xi_F \approx 0.3$  nm.



25. OBR. POKLES ODPORU FEROMAGNETICKÉHO MATERIÁLU V ZÁREZE S/F/S NANOSPOJA OD MAGNETICKÉHO POJA KOLMÉHO NA ŠTRUKTÚRU.

## 2. Nепrepletaná vrstva YBCO v nanospojii (obr. 24. b)

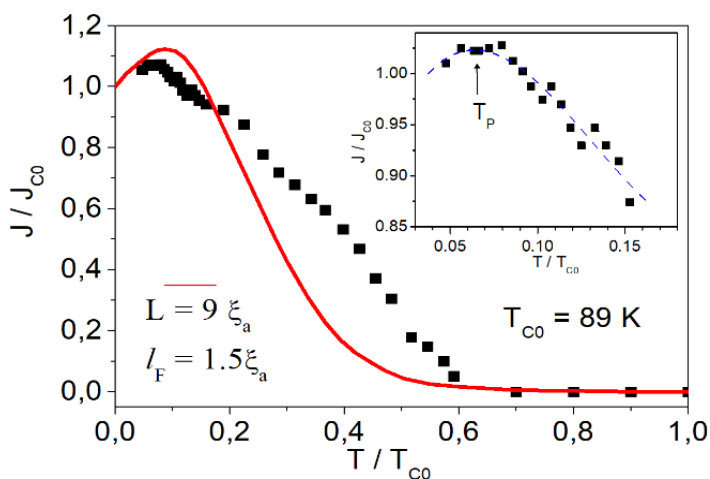
V týchto prípadoch YBCO vrstva nebola prepletaná a ani výraznejšie degradovaná paralelným zväzkom  $\text{Ga}^+$  iónov. Typické  $R(T)$  závislosti takéhoto spoja boli veľmi blízke k závislostiam nanopásikovej štruktúry ( $w > 400$  nm). Na také S/F/S spoje sme urobili ďalšie doleptanie YBCO vrstvy pomocou IBE.

## 3. Supravodivý S/F/S spoj (obr. 24. c)

Kritická teplota  $T_{c1} \approx 52$  K takéhoto spoja bola výrazne nižšia ako kritická teplota vrstvy YBCO  $T_{c0} \approx 89$  K. Podľa teoretických prác Eschriga [10] nemonotónna závislosť  $I_c(T)$  je jednoznačným dôkazom existencie tripletnej supravodivosti v S/F/S spojoch. Na obr. 26. sú prezentované  $I_c(T)$  závislosti dvoch S/F/S

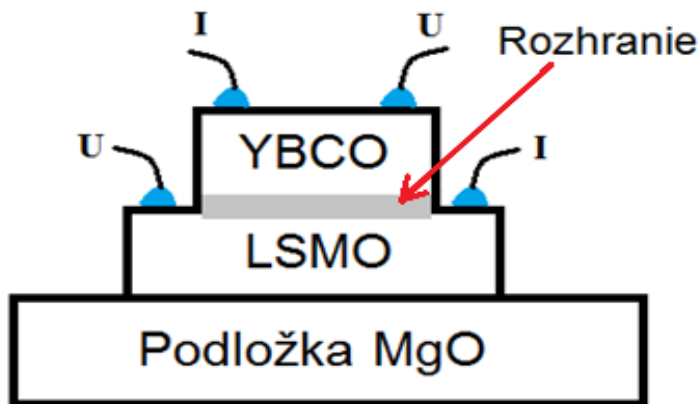
nanospojoch (body), ktoré nesú znaky teoretických priebehov  $I_c(T)$  S/F/S nanospoja.

Nemonotónny charakter  $I_c(T)$  závislostí je silným argumentom prítomnosti tripletnej zložky Cooperových párov v S/F/S nanospojoch zhoda s teoretickými priebehmi je viac menej iba kvalitatívna, interpretujeme ich ako zmes závislostí dvoch zložiek supravodivého prúdu pozostávajúcich zo singletného párovania (možné zvyšky YBCO vrstvy v S/F/S nanospoji) a tripletnej zložky v LSMO vrstve.



26. OBR. EXPERIMENTÁLNA TEPLNOTNÁ ZÁVISLOSŤ KRITICKÉHO PRÚDU S/F/S NANOSPOJA (BODY) POROVNANÉ S TEORETICKÝM PRIEBEHOM PODĚA [9] PRE RÔZNE DĹŽKY L NANOSPOJOV.

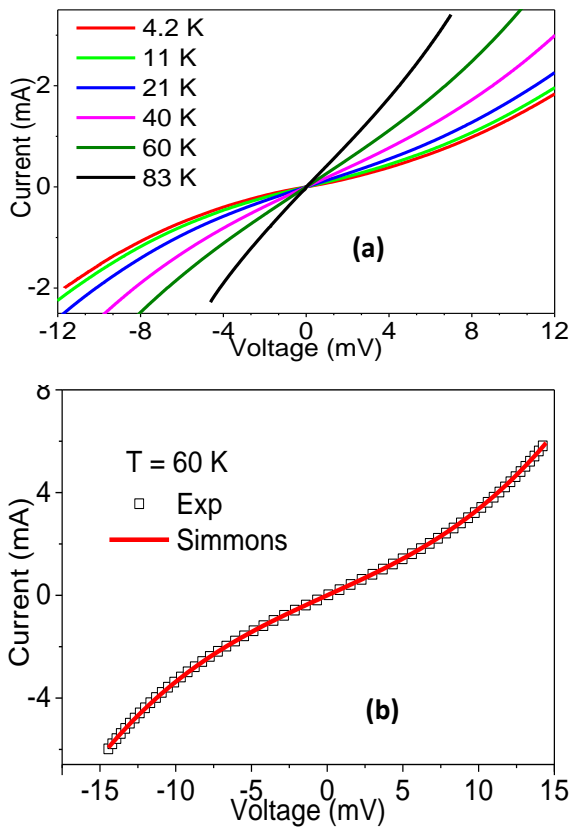
## Rozhranie LSMO/YBCO



27. OBR. PRIEČNY REZ ŠTRUKTÚRY NA VYŠETROVANIE ROZHRAINIA VRSTIEV LSMO/YBCO (ŠEDÁ OBLASŤ) ELEKTRICKÝMI METÓDAMI.

V rámci štúdia rozhrania LSMO/YBCO sme pripravili štruktúru, na ktorej sme vyšetrili rozhranie LSMO/YBCO elektrickými meraniami (obr. 27.). Boli premerané volt-ampérové charakteristiky (VACH) pri teplotách 83, 60, 40, 21, 11 a 4.2 K (obr. 28. a). Pri teplote  $T = 60$  K (obr. 28. b) je porovnaný priebeh VACH s teoretickým priebehom pre tunelovú (dielektrickú) bariéru pre nízke napätie odvodený Simmonsom [18] v tvare  $I = \alpha(1 + 3\gamma V^3)$ , kde  $\alpha$  a  $\gamma$  sú charakteristické konštanty pre daný tunelový spoj, ktoré sa dajú zistiť z riešenia rovnice diferenciálnej vodivosti [19]. Po vyriešení známych vzťahov [18], [19] môžeme určiť dôležité parametre bariéry ako je hrúbka  $t \approx 9-10$  nm a výška potenciálnej bariéry  $\phi \approx 40$  meV. Z uvedeného vyplýva, že rozhranie LSMO/YBCO sa správa ako

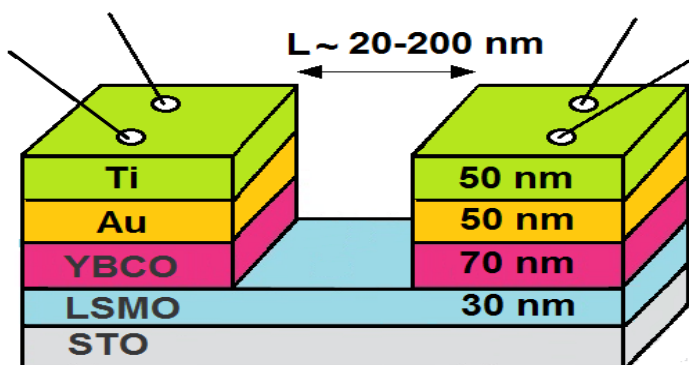
dielektrická bariéra, podobné výsledky získali aj ďalší autori [20]–[23].



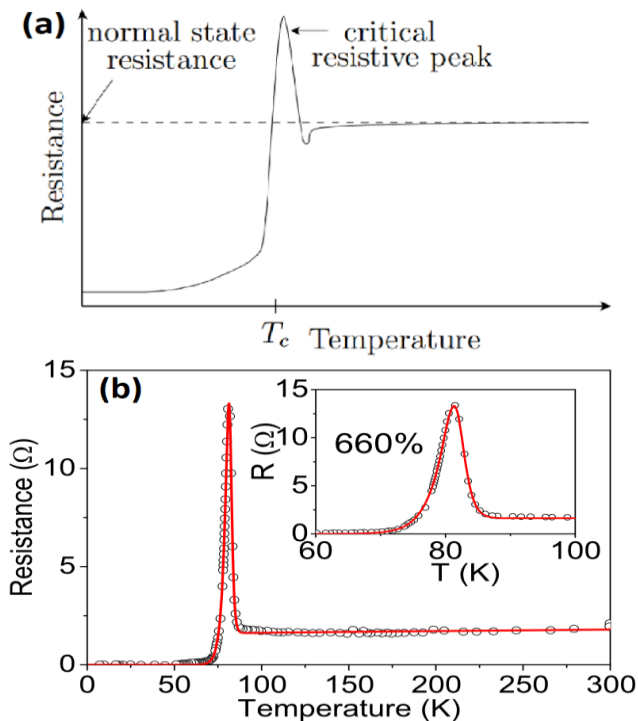
28. OBR. VOLT-AMPÉROVÉ CHARAKTERISTIKY ROZHRANIA LSMO/YBCO PRE RÔZNE TEPLoty  $T < T_{c0}$  (a) A POROVNANIE PRIEBEHU VACH PRI 60 K (BODY) S TEORETICKÝM PODĽA SIMMONSA (ČIARA) (b) [18]

## Simulačné výpočty anomálnych teplotnej závislosti odporu N/S/F/S/N

Tenkovrstvové S/F/S nanospoje vďaka ochrannej vrstve Au mali vlastne komplikovanejšie zloženie N/S/F/S/N, kde N – je Au vrstva, ako nesupravodivý kov, S – je YBCO supravodivá vrstva, F – je feromagnetická vrstva (obr. 29.). Pri meraní  $R(T)$  závislostí S/F/S nanospojov sa často prejavovali odporové anomálie prejavujúce sa ako odporové špičky. Z literatúry, napr. [24] boli známe takéto anomálie, avšak ich amplitúda dosahovala hodnôt iba niekoľko % odporu v normálnom stave  $R_N$ . V niektorých našich prípadoch odpor špičky dosiahol až 660% hodnoty  $R_N$  (obr. 30.) alebo dokonca zápornú hodnotu odporu na konci prechodu, čo nebolo v literatúre dosiaľ uvedené a vyšetrované. Na vysvetlenie týchto anomálií sme vytvorili jednoduchý simulačný model. Namerané a simulované priebehy  $R(T)$  vykazovali vysokú zhodu.



29. OBR. NANOSPOJ YBCO/LSMO/YBCO



30. OBR. ODPOROVÁ ANOMÁLIA PRI PRECHODU DO SUPRAVODIVÉHO STAVU (a), ODPOROVÁ ŠPIČKA V NIEKTORÝCH PRÍPADOCH DOSIAHOL AŽ 660% NORMÁLNEJ HODNOTY (b). BODKY SÚ NAMERANÉ HODNOTY, ČERVENÁ KRIVKA JE SIMULOVANÝ PRIEBEH.

## Simulačný model

Simulačný model bol založený na elektrickom transporte paralelne zapojených vrstiev nesupravodivej Au a supravodivej YBCO v našej N/S/F/S/N štruktúre (viď obr. 29.), čiže pre výsledný odpor platí:



$$\frac{1}{R(T)} = \frac{1}{R_Y(T)} + \frac{1}{R_{Au}(T)}$$

$R_Y(T)$  je štandardná závislosť odporu od teploty supravodivej vrstvy YBCO (obr. 31. a) a je definovaná ako:

$$R_Y(T) = R_{NY}(T) \times T_Y(T)$$

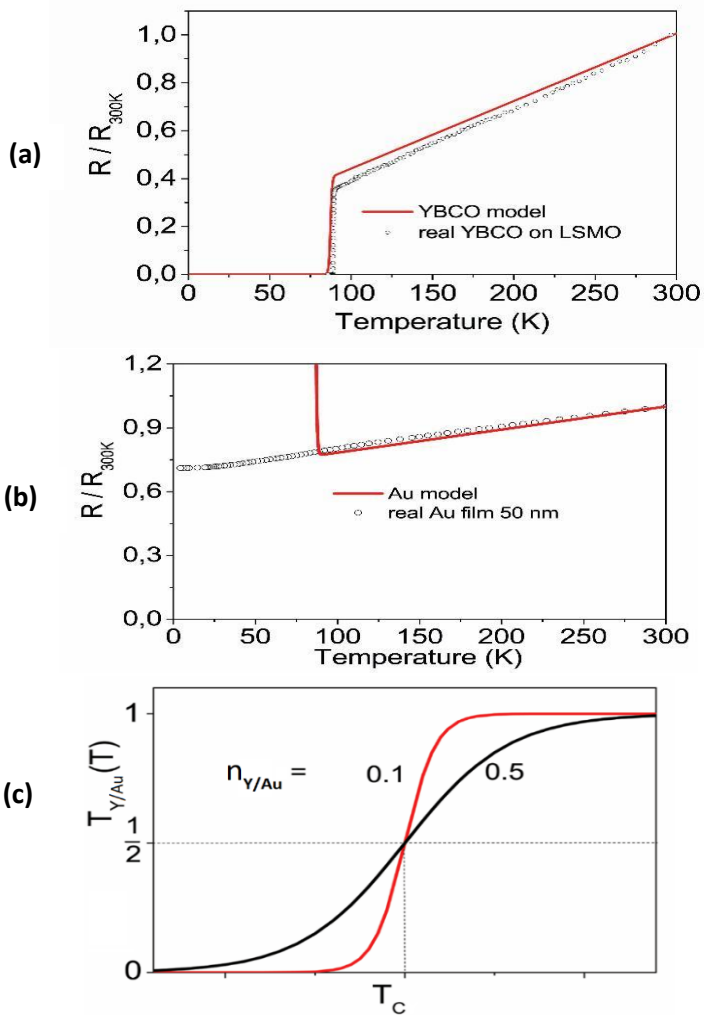
Odporová závislosť  $R_{Au}(T)$  pre Au vrstvu (obr. 31. b) je definovaná ako pomer dvoch funkcií:

$$R_{Au}(T) = R_{NAu}/T_{Au}(T)$$

kde  $R_{NAu}(T) = R_{0Au}[1 + \alpha_{Au}(T - T_0)]$  je bežná charakteristika teplotnej závislosti odporu vrstvy zlata, platí nad  $\sim 90$  K. V druhej časti pod  $\sim 90$  K je modelovaný vzostup odporu Au vrstvy podľa teórie Takei a Galitski [24].

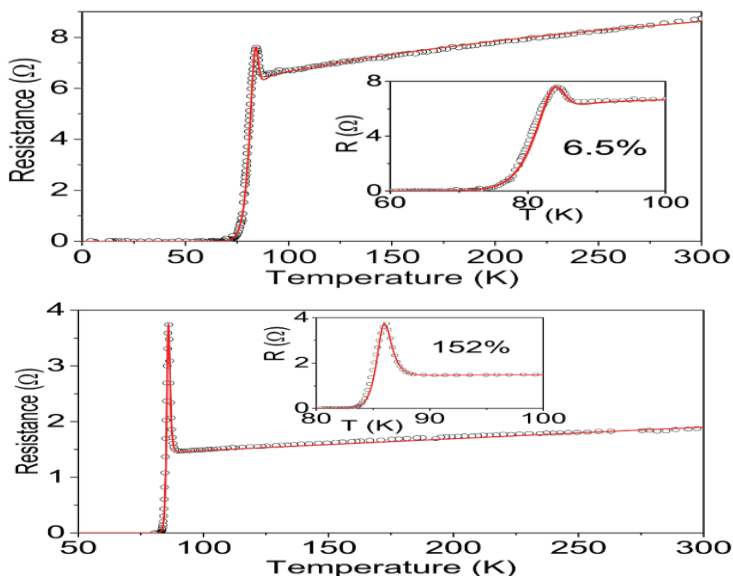
$R_{NY}(T) = R_{0Y}[1 + \alpha_Y(T - T_0)]$  je lineárna závislosť odporu od teploty pre YBCO, ktorý platí pre teploty  $\sim 90 - 300$  K.

$T_{Y/Au}(T) = 1 / \left( n_{Y/Au}^{(T-T_{CY/Au})} + 1 \right)$  je prechodová funkcia (obr. 31. c) pre supravodivý prechod a pre vzostup odporu Au vrstvy, ktorá dosiahne hodnoty 0 až 1 pre  $n_{Y/Au} < 1$ . Parameter  $n_{Y/Au}$  určuje šírku prechodu,  $T_{CY}$  je simulačná kritická teplota YBCO, keď  $R = \frac{1}{2} R_N$ .  $R_{0Y}$  a  $R_{0Au}$  je odpor YBCO a Au vrstvy pri teplote  $T_0 = 273$  K,  $\alpha_Y$  a  $\alpha_{Au}$  je sklon lineárnej závislosti.



31. OBR. POROVNANIE  $R(T)$  PRIEBEHU NAMERANÝCH HODNÔT (ČIERNÉ BODKY) SO SIMULÁCIAMI (ČERVENÁ ČIARA). (a) – PRE SUPRAVODIVÚ VRSTVU YBCO. (b) – PRE AU VRSTVU. (c) – SIMULAČNÝ PRIEBEH SUPRAVODIVÉHO PRECHODU S PARAMETRAMI  $n_{Y/Au}$  (ŠÍRKA PRECHODU) A  $T_c$

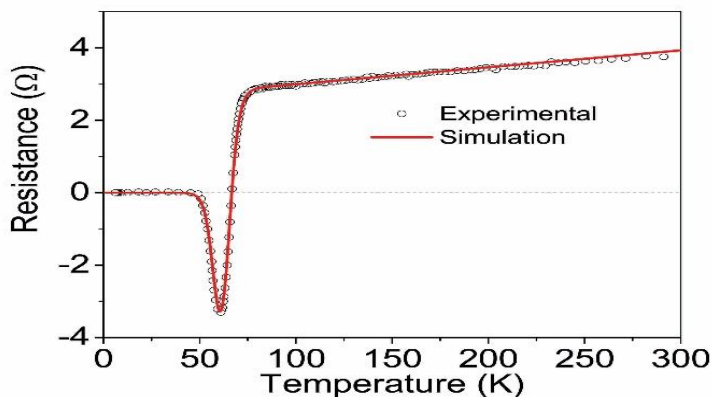
Simulácie jasne indikujú, že výskyt odporového píku pochádza z rozhrania S/N (YBCO/Au) a je v súlade s prechádzajúcimi výsledkami našej skupiny [25], [26]. V teplotnej oblasti od 300 do  $\sim 90$  K prúd tečie v zlatej vrstve, lebo jej odpor  $R_{Au}(T)$  je menší ako odpor  $R_Y(T)$  YBCO vrstvy. V prechodovej oblasti supravodivosť je indukovaná do zlatej vrstvy, čo vedie k rastúcemu odporu vrstvy [24], čo spôsobuje odporovú špičku na  $R(T)$  závislosti. Pričom súčasne YBCO vrstva prechádza do supravodivého stavu, jej odpor je čoraz menší a keď odpor YBCO vrstvy  $R_Y(T) < R_{Au}(T)$  prúd začne prechádzať cez YBCO vrstvu, čím registrujeme prechod úplne do supravodivého stavu podľa vrstvy YBCO.



32. OBR. POROVNANIE  $R(T)$  PRIEBEHU NAMERANÝCH HÓDNÔT (ČIERNÉ BODKY) SO SIMULÁCIAMI (ČERVENÁ ČIARA) PRE RÔZNE VÝŠKY VZOSTUPU ODPORU

## „Negatívny odpor“

Pozorovali sme ďalšie zaujímavé charakteristiky N/S/F/S/N spoja, keď  $R(T)$  charakteristika na konci prechodu prešla do záporných hodnôt (obr. 33.). Vysvetlenie tohto javu spočíva

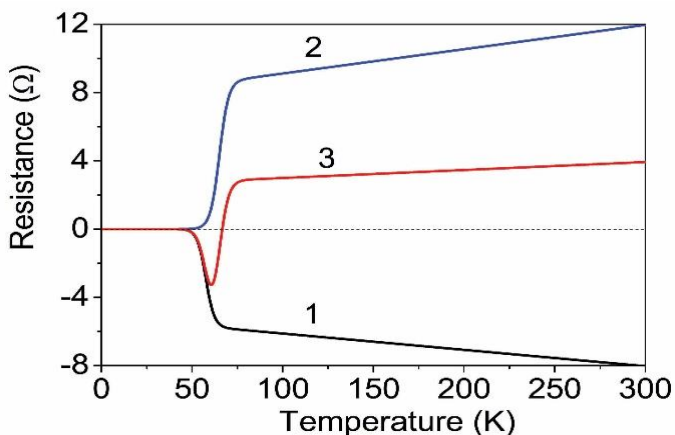


33. OBR.  $R(T)$  CHARAKTERISTIKA PRECHODU ODPORU DO ZÁPORNÝCH HODNÔT

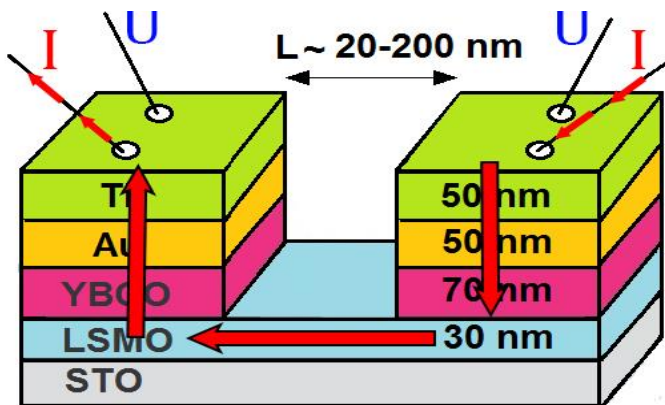
v takej prúdovej dráhe, ktorá generuje zápornú hodnotu napätia na meracom zariadení [27]. Zodpovedajúca  $R_{if1}$  charakteristika s „negatívnym“ odporom takéhoto S/F rozhrania (YBCO a LSMO) je reprezentované na obr. 34 – krivka 1.  $R_{if2}$  závislosť je štandardná  $R(T)$  charakteristika S/N rozhrania ukázané na obr. 34. – krivka 2. Na vysvetlenie  $R(T)$  charakteristiky takéhoto rozhrania sme navrhli sériové zapojenie S/F a S/N rozhrania (obr. 35.):

$$R(T) = R_{if1}(T) + R_{if2}(T)$$

Úspešnosť modelu s reálnymi  $R(T)$  závislosťami (obr. 32.) hovorí o tom, že transportné javy môžu silno ovplyvniť supravodivý prechod v spintronických zariadeniach.



34. OBR.  $R(T)$  CHARAKTERISTIKA: S/F ROZHRAŇIA (KRIVKA 1), N/S ROZHRAŇIA (KRIVKA 2), VÝSLEDOK JE SÉRIOVÉ ZAPOJENIE ZÁVISLOSTI 1 A 2 (KRIVKA 3)



35. OBR. PRÚDOVÁ DRÁHA N/S/F/S/N SPOJA

# Prezentácia výsledkov

## Publikácie

1. **N. Gál**, V. Štrbík, Š. Gaži, S. Chromik, and M. Talacko, “Resistance Anomalies at Superconducting Transition in Multilayer N/S/F/S/N Heterostructures,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 32, pp. 1–5, 2018.
2. V. Štrbík, T. Nurgaliev, M. Sojková, Š. Chromik, M. Španková, **N. Gál**, and B. Blagoev, “Properties of LSMO/YBCO cross-strip type junctions,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 992, p. 012052, Mar. 2018.
3. T. Nurgaliev, V. Štrbík, **N. Gál**, Š. Chromik, and M. Sojková, “Electrical transport effects in YBCO/LSMO bilayer junctions,” *Phys. B Condens. Matter*, vol. 550, pp. 324–331, Dec. 2018.
4. V. Štrbík, Š. Beňačka, Š. Gaži, M. Španková, V. Šmatko, J. Knoška, **N. Gál**, Š. Chromik, M. Sojková, and M. Pisarčík, “Superconductor-ferromagnet-superconductor nanojunctions from perovskite materials,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 395, pp. 237–240, Feb. 2017.
5. V. Štrbík, Š. Beňačka, Š. Gaži, M. Španková, V. Šmatko, Š. Chromik, **N. Gál**, J. Knoška, M. Sojková, and M. Pisarčík, “Transport properties of  $YBa_2Cu_3O_x/La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$  nanostrips and  $YBa_2Cu_3O_x/La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3/YBa_2Cu_3O_x$  nanojunctions,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 700, p. 012021, Mar. 2016.

6. M. Sojtková, V. Štrbík, T. Nurgaliev, Š. Chromik, E. Dobročka, M. Španková, B. Blagoev, and **N. Gál**, “Fabrication of hybrid thin film structures from HTS and CMR materials,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 700, p. 012022, Mar. 2016.

### Citácie

“Superconductor-ferromagnet-superconductor nanojunctions from perovskite materials,” Appl. Surf. Sci., vol. 395, pp. 237–240, Feb. 2017.

1. L. Ma et al. *Sensors and Actuators B: Chemical* 255 (2018), 2546–2554
2. X. Liu et al. *Journal of Alloys and Compounds* 772 (2019), pp. 263-271

“Electrical transport effects in YBCO/LSMO bilayer junctions,” Phys. B Condens. Matter 550, pp. 324–331, Dec. 2018.

3. A. Bahboh et al. *Ceramics International* 45(11) (2019), pp. 13732-13739

### Medzinárodné konferencie

1. **CSMAG 17** (17th Czech and Slovak Conference on Magnetism, June 3.-7. 2019, Košice, Slovakia)
2. **Phd. Conference**, Universtiy of Pécs, Hungary, May, 2019
3. **ICSM 2018** (6th International Conference on Superconductivity and Magnetism, April 29 - May 04, 2018, Antalya, Turkey)

4. **SSSI 2018** (Solid State Surfaces and Interfaces 2018, November 19 – 22, Smolenice, Slovakia)
5. **Phd. Conference**, Universtiy of Debrecen, Hungary, April, 2017
6. **CSMAG 16** (16th Czech and Slovak Conference on Magnetism, June 13.-17. 2016, Košice, Slovakia)
7. **VEIT 2015** (Nineteenth international summer school on vacuum, electron and ion technologies, 21 – 25 September 2015, Sozopol, Bulgaria)
8. **SURFINT-SREN IV** (Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2015, 23-26. November 2015, Florence, Italy)



## Použitá literatura

- [1] A. I. Larkin and Y. N. Ovchinnikov, "Nonuniform state of superconductors," *Zh Eksp Teor Fiz*, vol. 47, pp. 1136–1146, 1964.
- [2] P. Fulde and R. A. Ferrell, "Superconductivity in a Strong Spin-Exchange Field," *Phys Rev*, vol. 135, no. 3A, pp. A550–A563, Aug. 1964.
- [3] C. Bernhard *et al.*, "Coexistence of ferromagnetism and superconductivity in the hybrid ruthenate-cuprate compound  $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$  studied by muon spin rotation and dc magnetization," *Phys Rev B*, vol. 59, no. 21, pp. 14099–14107, Jun. 1999.
- [4] S. S. Saxena *et al.*, "Superconductivity on the border of itinerant-electron ferromagnetism in  $\text{UGe}_2$ ," *Nature*, vol. 406, p. 587, Aug. 2000.
- [5] M. B. Maple, "Three decades of progress on superconductivity and magnetism in novel materials," *Physica. C*, vol. 341–348, pp. 47–52, 2000.
- [6] M. Weides, "Josephson tunnel junctions with ferromagnetic interlayer," Dissertation Thesis, University of Cologne, 2019.
- [7] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, "Odd triplet superconductivity and related phenomena in superconductor-ferromagnet structures," *Rev Mod Phys*, vol. 77, no. 4, pp. 1321–1373, Nov. 2005.
- [8] M. G. Blamire and J. W. A. Robinson, "The interface between superconductivity and magnetism: understanding and device prospects," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 26, no. 45, p. 453201, Oct. 2014.
- [9] J. Linder and J. W. A. Robinson, "Superconducting spintronics," *Nat. Phys.*, vol. 11, p. 307, Apr. 2015.

- [10] M. Eschrig and T. Löfwander, "Triplet supercurrents in clean and disordered half-metallic ferromagnets," *Nat. Phys.*, vol. 4, p. 138, Jan. 2008.
- [11] T. Y. Chien *et al.*, "Visualizing short-range charge transfer at the interfaces between ferromagnetic and superconducting oxides," *Nat. Commun.*, vol. 4, p. 2336, Aug. 2013.
- [12] T. Holden *et al.*, "Proximity induced metal-insulator transition in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$  superlattices," *Phys. Rev. B*, vol. 69, no. 6, p. 064505, Feb. 2004.
- [13] *Firemný softvér k RTG zariadeniu Bruker D8 DISCOVER diffractometer.*
- [14] *Firemný softvér k AFM zariadeniu NTEGRA Prima, NT-MDT.*
- [15] V. Štrbík and Š. Chromik, "Characterization of Electrical Transport in Lsmo with Enhanced Temperature of Metal-Insulator Transition," *J. Electr. Eng.*, vol. 63, no. 4, pp. 270–272, 2012.
- [16] K. Kubo and N. Ohata, "A Quantum Theory of Double Exchange. I," *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 33, no. 1, pp. 21–32, Jul. 1972.
- [17] V. T. Petrashov, I. A. Sosnin, I. Cox, A. Parsons, and C. Troadec, "Giant Mutual Proximity Effects in Ferromagnetic/Superconducting Nanostructures," *Phys Rev Lett*, vol. 83, no. 16, pp. 3281–3284, Oct. 1999.
- [18] J. G. Simmons, "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film," *J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 6, pp. 1793–1803, Jun. 1963.
- [19] J. M. Rowell, *Tunneling Phenomena in Solids (ed. E. Burstein, S. Lundqvist, Plenum Press, New York) chapter 27 pp. 385-404.* 1969.

- [20] A. Sawa *et al.*, “Spin-polarized tunneling of  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  junctions,” *Physica C Supercond.*, vol. 339, no. 4, pp. 287–297, Nov. 2000.
- [21] Z. Y. Chen *et al.*, “Spin-polarized transport across a  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  interface: Role of Andreev bound states,” *Phys Rev B*, vol. 63, no. 21, p. 212508, May 2001.
- [22] M. van Zalk, A. Brinkman, J. Aarts, and H. Hilgenkamp, “Interface resistance of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$  ramp-type contacts,” *Phys Rev B*, vol. 82, no. 13, p. 134513, Oct. 2010.
- [23] B. A. Gray *et al.*, “Superconductor to Mott insulator transition in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{LaCaMnO}_3$  heterostructures,” *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 33184, Sep. 2016.
- [24] S. Takei and V. Galitski, *Microscopic theory for a ferromagnetic-nanowire/superconductor heterostructure: Transport, fluctuations and topological superconductivity*, *Phys. Rev. B*, vol. 86, p. 054521, 2012.
- [25] Š. Benačka, V. Štrbík, Z. Ószi, M. Darula, I. Kostic, and K. Karlovsky, “Resistance anomaly near superconducting-normal metal interface,” *Acta Phys. Slovaca*, vol. 50, no. 4, pp. 397–402, 2000.
- [26] N. Gál, V. Štrbík, Š. Gaži, Š. Chromik, and M. Talacko, “Resistance Anomalies at Superconducting Transition in Multilayer N/S/F/S/N Heterostructures,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 32, pp. 1–5, 2018.
- [27] M. Sojková, T. Nurgaliev, V. Štrbík, Š. Chromik, B. Blagoev, and M. Španková, “LSMO/YBCO Heterostructures and Investigation of ‘Negative’ Resistance Effect in the Interface,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 131, no. 4, pp. 842–844, Apr. 2017.