

STIPRIOS $I \gg I_c$ ELEKTROS SROVĖS TANKIO PASISKIRSTYMAS PLONUOSE
Y-BA-CU-O SLUOKSNIUOSE, TURINČIUOSE SILPNOJO SUPERLAIDUMO SRITISJonas Šulcas¹, Artūras Jukna²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹j.sulcas@etronika.lt; ²arturas.jukna@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjamas elektros srovės pasiskirstymas $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superlaidininko plonuose sluoksniuose, kuriuose lazerio spinduliu suformuoti II formos sūkurių kanalai. Superlaidžiajame darinyje atsiradus sūkurių kanalui, srovės tankis lokaliose darinio vietose gali skirtis 5 ir daugiau kartų, priklausomai nuo kanalo geometrijos. Darbe eksperimentiškai nustatyta, kad Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentinis judėjimas sūkurių kanale siaurame temperatūrų ruože nuo 85,1 K iki 90,2 K prasideda superlaidžiuoju dariniu tekant $I \sim I_c$ ir išlieka iki ypač stiprių srovių $I > 200I_c^{1st\ step}$. Čia $I^{1st\ step}$ – srovės stipris, kuriam esant sūkurių kanale vyksta koherentinis sūkurių judėjimas, o I_c – kritinė superlaidininko srovė. Koherentinis sūkurių judėjimas kanalo srityje eksperimentuose pasireiškia darinių voltamperinėse charakteristikose elektros įtampos „laupteliais“, kurių aukštis beveik nepriklauso nuo darinių tekančios srovės stiprio. Eksperimentiniai rezultatai paaiškinti koherentinio sūkurių judėjimo ypatumais II formos sūkurių kanalu.

Reikšminiai žodžiai: superlaidininkas, plonas sluoksnis, krizinė superlaidininko srovė, Abrikosovo magnetinis sūkurys, sūkurių kanalas, prierašos jėga, Lorencio jėga.

Įvadas

II rūšies $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Y-Ba-Cu-O) superlaidininkai, esant temperatūrai T , žemesnei nei kritinė superlaidininko temperatūra T_c , tampa mišriosios būsenos. Esant mišriajai medžiagos būsenai kartu koegzistuoja superlaidžioji ir nesuperlaidžioji medžiagos fazės (Abrikosov 2004). Mišriąją medžiagos būseną gali sukurti išorinis magnetinis laukas, kurio stipris didesnis už H_{c1} , arba elektros srovė, kurios kuriamas magnetinio lauko stipris didesnis už H_{c1} .

II rūšies superlaidininkuose mišriąją būseną realizuoja Abrikosovo magnetiniai sūkuriai. Magnetinis sūkurys – tai spindulio $r \sim \xi$ cirkularinė elektros srovė, kurios kuriamas magnetinio lauko srautas lygus magnetinio lauko srauto kvantui $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Wb. Čia ξ – koherentiškumo ilgis superlaidininke. Stiprinant elektros srovę (arba išorinį magnetinį lauką), bandinyje didėja sūkurių skaičius: $N = B/\Phi_0$, čia B – elektros srovės sukurta magnetinio lauko indukcija.

Superlaidininkų krizinė srovė apibrėžiama maksimalia srove, galinčia tekėti superlaidininku be pasipriešinimo. II rūšies superlaidininkuose ši srovė siejama su Abrikosovo magnetinių sūkurių / antisūkurių judėjimo pradžia (Pautrat *et al.* 2003). Sūkuriai juda superlaidžiuoju sluoksniu statmenai elektros srovės, tekančios sluoksniu, kryptį. Judėjimui pradžią duoda srovės kuriama Lorencio jėga $F_L = JB$, kurios stipris viršija sūkurių prierašos jėgą $F_p = J_c B$. Čia J ir J_c atitinkamai – elektros srovės, tekančios superlaidininku,

ir kritinis superlaidininko srovės tankiai. Ploname superlaidininko sluoksnyje, kai $I \sim I_c$, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai viename superlaidžiojo sluoksnio krašte ir antisūkuriai priešpriešiniame krašte pradeda judėti vieni link kitų. Susitikę sluoksnio viduryje (ties anihilacijos linija) sūkuriai ir antisūkuriai anihiliuoja. Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas pasireiškia elektriniais nuostoliais, įvertinamais eksperimentuose elektrine įtampa, esant temperatūrai $T < T_c$.

Šiame darbe tiriami koherentinio Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo ypatumai superlaidžiajame Y-Ba-Cu-O darinyje, kuriame lazerių suformuotas II formos sūkurių kanalas. Elektros srovei tekant superlaidininku, tik į kanalo sritį įsiskverbęs srovės kuriamas magnetinis laukas kanale sudaro stipriai tarpusavyje sąveikaujancius Abrikosovo magnetinius sūkurius. Darbo rezultatai rodo, kad sūkurių judėjimo koherentinis pobūdis išlieka net tuomet, kai superlaidininku teka srovė $I \gg I_c$, t. y. ji net šimtus kartų viršija kritinę superlaidininko srovę superlaidžiajame sūkurių kanale.

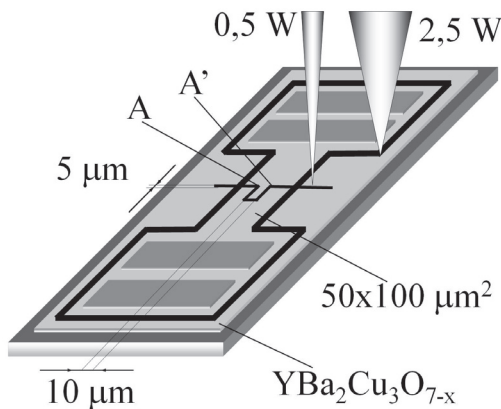
Bandiniai ir tyrimų įranga

Superlaidieji Y-Ba-Cu-O sluoksniai buvo pagaminti cheminio metalų nusodinimo iš metalų organinių garų fazės (MOCVD) metodu ant LaAlO_3 monokristalinių padėklų. Užaugintų sluoksnių, kurių storis $\sim 0,3 \mu\text{m}$, kristalografinė c -ašis orientuota statmenai padėko plokštumai.

Krizinė superlaidžiosios būsenos atsiradimo superlaidininke temperatūra $T_c^{on} = 91,4$ K, o krizinis srovės tankis, matuojant nanosekundžių trukmės elektriniais impulsais (Jukna *et al.* 1999), esant $T = 78$ K temperatūrai, lygus $J_c(78\text{ K}) \sim 1,5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$.

Tyrimui reikalingi $100\ \mu\text{m}$ ilgio ir $50\ \mu\text{m}$ pločio superlaidieji Y-Ba-Cu-O dariniai, „įdegti“ $2,5\ \text{W}$ galios lazerio šviesos spinduliu, sufokusuotu sluoksnio paviršiuje į $\sim 5\ \mu\text{m}$ skersmens dėmę (1 pav.), superlaidininko sluoksniui esant kambario temperatūroje ir inertinių dujų apsuptyje. Sąveikaudamas su lazerio spinduliuote superlaidininkas įkaito daugiau kaip $T = 670\ \text{K}$ temperatūros, kuri literatūroje įvardyta Y-Ba-Cu-O medžiagos fazinio virsmo iš ortorombinės į tetragoninę kristalinę struktūrą temperatūra (Xie *et al.* 1989). Lazerio šviesa paveiktos plono sluoksnio sritys prarado deguonį (t. y. $x > 0,6$ iš $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) ir tapo nesuperlaidžiomis netgi, kai $T \ll T_c^{on}$. Darinių įdeginimo procesas vykdytas superlaidininko sluoksnį pritvirtinus prie kompiuteriu valdomo dviejų koordinatinių staliuko.

Pagamintuose superlaidžiuosiuose dariniuose buvo lazeriu suformuotas superlaidžiusis II formos Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalas. Kanalas formuotas ta pačia optine įranga, lazerio galią sumažinus iki $0,5\ \text{W}$. Mažesne lazerio energija įkaitintos superlaidininko $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ sritys prarado tik nedidelę dalį deguonies t. y. $x < 0,2$.



1 pav. $100\text{-}\mu\text{m}$ pločio, $50\text{-}\mu\text{m}$ ilgio ir $0,3\text{-}\mu\text{m}$ storio Y-Ba-Cu-O didelės galios lazerio spinduliu „įdegtas“ superlaidžiusis YBCO darinys, MOCVD būdu užaugintas ant LaAlO_3 padėklo. Mažesnės galios lazerio spinduliu suformuotas II formos kanalas, skirtas Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui

Fig. 1. $100\text{-}\mu\text{m}$ -long, $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide, and $0,3\text{-}\mu\text{m}$ -thick Y-Ba-Cu-O microbridge laser patterned in a single Y-Ba-Cu-O film that has been MOCVD deposited onto LaAlO_3 substrate. The microbridge contains the laser written channel for easy vortex motion

Bandinio, kuriame suformuotas Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalas, savybės skiriasi nuo bandinio be kanalo savybių (Jukna *et al.* 2006, 2008). Pavyzdžiui, bandinių

su sūkurių kanalu krizinė temperatūra T_c yra pastebimai žemesnė, o esant elektrinės varžos priklausomybei nuo temperatūros, atsiranda papildomos elektrinės varžos priedas (Jukna *et al.* 2006). Papildomai nustatyta, kad superlaidininko kritinės srovės tankis temperatūrų intervale nuo 88 iki $89\ \text{K}$ sumažėja net ~ 1000 kartų, lyginant jį su krizine srove bandinio be sūkurių kanalo.

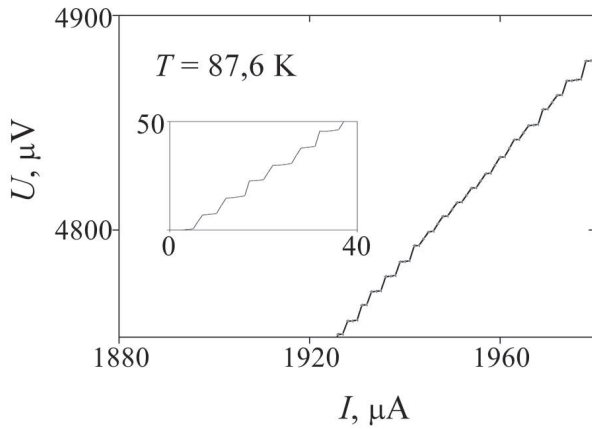
Ankstesniuose darbuose (Šulcas *et al.* 2011) nustatyta, kad dėl II formos magnetinių sūkurių kanalo superlaidžio darinio srityje tarp taškų A ir A' (žr. 1 pav.), srovės tankis superlaidžiosiose bandinio dalyse (t. y. šalia sūkurių kanalo) gali padidėti net 10 kartų, lyginant jį su srovės tankiu kitose atokiau nuo sūkurių kanalo esančiose bandinio srityse. Minėtas srovės tankio padidėjimas priklauso nuo kanalo geometrijos (Šulcas *et al.* 2011). Todėl tikėtina, kad superlaidžiuoju dariniu su sūkurių kanalu tekant elektros srovei, kurios tankis artimas bandinio be kanalo kritiniam srovės tankiui J_c , tarp kanalo taškų A ir A' taip pat gali atsirasti Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Tiriant plonasluoksnių superlaidžiųjų bandinių su lazeriu suformuotais Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalais elektrines savybes nustatyta, kad jų voltamperinėse charakteristikose yra elektrinės įtampos laipteliai. Laipteliai stebėti tik superlaidžiuosiuose bandiniuose su II formos kanalais, esant siauram temperatūrų intervalui nuo $85,1$ iki $90,2\ \text{K}$. Tačiau įtampos laiptelių nebuvo superlaidžiųjų darinių be sūkurių kanalų voltamperinėse charakteristikose.

Įtampos laiptelių atsiradimas susietas su sūkurių / antisūkurių porų susidarymu ir jų judėjimu sūkurių kanalu link anihiliacijos linijos (Jukna *et al.* 2008). Kiekvienas laiptelis voltamperinėje charakteristikoje susijęs su energijos nuostoliais, reikalingais papildomos sūkurių / antisūkurių poros kondensacijai superlaidžiajame sūkurių kanale (Steponavičienė *et al.* 2009). Tačiau laiptuotą voltamperinę charakteristiką formuoja ne tik papildomos sūkurių poros atsiradimas, bet ir sūkurių judėjimas sūkurių kanalu. Stiprinant elektros srovę, kanalu judančių magnetinių sūkurių greitis didėja. Todėl įtampos laiptelis stipresnių elektros srovių atveju turėtų būti aukštesnis nei silpnesnių srovių atveju. Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodyti 2 pav., kuriame demonstruojama Y-Ba-Cu-O bandinio su II formos sūkurių kanalu voltamperinė charakteristika, išmatuota esant temperatūrai $T = 87,6\ \text{K}$.

Kokybiniam palyginimui 2 pav. pateikta voltamperinė bandinio charakteristika silpnų srovių atveju ($I \sim I_c$) ir tuo atveju, kai srovė $I > 200I_c$. Čia I_c – Y-Ba-Cu-O superlaidžio bandinio kanale kritinės srovės stipris.



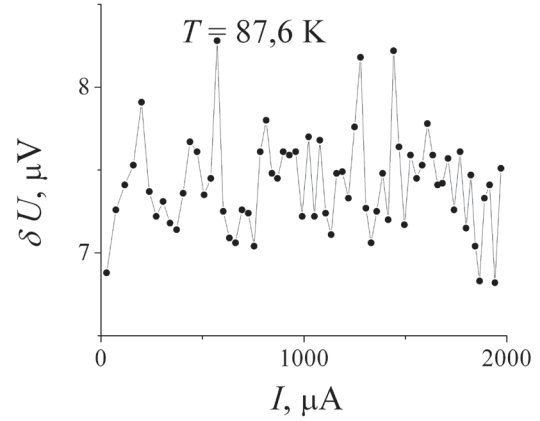
2 pav. 100 μm ilgio, 50 μm pločio ir 0,3 μm storio superlaidžiojo $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ bandinio su Abrikosovo magnetinių sūkurių II formos kanalu voltamperinė charakteristika, išmatuota nuostoviosios elektros srovės režime, kai $I \sim 200 I_c$. Įklija: tos pačios voltamperinės charakteristikos dalis, kai srovės stipris $I \sim I_c$

Fig. 2. The I - V characteristic of 100- μm -long, 50- μm -wide and 0.3- μm -thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting microbridge containing II-shaped channel for easy vortex motion at bias current $I \sim 200I_c$. Inset: The same dependence measured at bias current $I \sim I_c$

Kol voltamperinėje bandinio charakteristikoje stebimi įtampos laipteliai, tol bandinyje vyksta koherentinis Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas. Reiktų pastebėti, kad stipresnės elektros srovės atveju (2 pav.) laipteliai atrodo mažiau taisyklingos formos. Šis rezultatas gali būti susijęs su šiuo atveju naudojamos matavimų įrangos skalės mažesniu jautriu ir papildomu magnetinių sūkurių judėjimu superlaidžiojo bandinio dalyje, lokalizuotoje tarp A ir A' taškų (1 pav.).

Kruopščiais įtampos laiptelių aukščio tyrimais pavyko nustatyti, kad laiptelių aukštis $\delta U \sim 7,5 \mu\text{V}$ išlieka nekintamas $\pm 5\%$ paklaidų ribose (3 pav.). Jei silpnų ir vidutinio stiprio elektros srovių atvejais ($0 < I < 1,6 \text{ mA}$) laiptelio aukštis nesikeičia (3 pav.), tai elektros srovei viršijus $I > 1,6 \text{ mA}$ vertę, įtampos laiptelių aukštis δU turi tendenciją mažėti.

Koherentinis Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas gali būti stebimas tik labai silpnos sūkurių prieraišos prieraišos centrų jėgos atveju, t. y. kai $F_L \gg F_p$. Koherentinis judėjimas gali vykti tik patenkinus tam tikras specifines sąlygas: jis gali atsirasti tik tuose superlaidžiuosiuose plonuosiuose sluoksniuose, kuriuose sūkurio / antisūkurio atsiradimo laikas sluoksnio kraštuose lygus jų lėkio laikui iki sūkurių anihilacijos linijos ir pačiai anihilacijai (Yuzhelevski *et al.* 1999). Jei sūkurių / antisūkurių atsiradimo laikas susijęs su konkrečiu superlaidininko specifinėmis savybėmis, tai sūkurių judėjimo greitis superlaidininke valdomas elektros srovės, tekančios superlaidininku, kuriamos Lorencio jėgos F_L stipriu. Tad, tiksliai parenkant F_L , galima sukurti palankias sąlygas Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentiniam judėjimui.



3 pav. Įtampos laiptelių aukščio, apskaičiuoto iš $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ bandinio voltamperinės charakteristikos, priklausomybė nuo bandiniu tekančios elektros srovės stiprio

Fig. 3. The amplitude of voltage steps measured by means of I - V dependences of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting microbridge vs. bias current

Turint mintyje, kad magnetinių sūkurių tankis sūkurių kanale nevienodas, priklausomai nuo kanalo formos (Šulcas *et al.* 2011), galima daryti išvadą, jog superlaidžiojo bandinio II formos kanale sūkurių koncentracija nevienoda. Dėl srovės tankio ir jos kuriamo magnetinio lauko nevienalytiškumo (Šulcas *et al.* 2011), sūkurių tankis turėtų būti didesnis A–A' kanalo srityse, t. y. arčiau superlaidžiojo bandinio krašto. Judantys A–A' sūkurių kanalo dalimi magnetiniai sūkuriai negali anihiliuoti, negalėdami susijungti su antisūkuriais. Dėl stiprios tarpusavio magnetinės sąveikos jiems tenka judėti kanalu lygiagrečiai su elektros srovės kryptimi ir tik pasiekus kanalo viršų (1 pav.) – anihiliuoti.

Stiprios srovės atveju, kai $I \sim 200I_c$, srovės tankis superlaidžiojo bandinio srityje, lokalizuotoje tarp kanalo A ir A' dalių, gali viršyti kritinę superlaidininko srovę superlaidžiojo bandinio dalies, nmodifikuotos lazerio šviesa. Todėl nagrinėjamoju stiprios srovės atveju šalia koherentinio Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo sūkurių kanale gali atsirasti papildomas sūkurių judėjimas superlaidininko dalyje, lokalizuotoje tarp kanalo A ir A' dalių. Papildomas sūkurių judėjimas nepriklauso nuo sūkurių judėjimo sūkurių kanalu, todėl įtampos laiptelių plotis (žr. 2 pav. srovės skalėje srovės intervalą $1,94 \text{ mA} < I < 1,975 \text{ mA}$) sumažėja. Laiptelio pločio mažėjimą galima paaiškinti papildomos sūkurio / antisūkurio poros superlaidžiamame bandinyje su II formos kanalu atsiradimu ne kanalo srityje, bet šalia jo. Deguonimi nenukurdintose superlaidžiojo bandinio dalyse pasireiškia sraigtnių dislokacijų kuriama ypač stipri (lyginant su superlaidininko medžiaga sūkurių kanale) magnetinių sūkurių prieraišos jėga. Todėl net ir menka temperatūros fluktuacija gali veikti šalia sūkurių kanalo atsir-

dusį sūkurių judėjimą. Dėl minėtos priežasties, priklausomai nuo temperatūros fluktuacijų, laiptelio plotis voltamperinėje charakteristikoje (žr. 2 pav. srovės skalėje srovės intervalą $I > 1,975$ mA), gali tiek padidėti, tiek ir sumažėti (2 pav.).

Išvados

Abrikosovo magnetinių sūkurių / antisūkurių koherentinis judėjimas (t. y. stipriai tarpusavyje sąveikaujančių sūkurių judėjimas) gali būti stebimas superlaidžiuosiuose dariniuose su lazeriu sukurtais Π formos magnetinių sūkurių kanalais plačiame elektros srovių intervale nuo $I_c < I < 200I_c$. Čia I_c – superlaidininko kritinės srovės stipris Π formos magnetinių sūkurių kanale. Koherentinis sūkurių judėjimas pasireiškia elektros įtampos laipteliais superlaidžių darinių voltamperinėse charakteristikose.

Įtampos laiptelių aukštis beveik nepriklauso nuo superlaidžiuoju dariniu tekančios elektros srovės stiprio, tačiau jų plotis (žr. voltamperinių charakteristikų srovės skalėje) ir laiptelių forma priklauso nuo darinio temperatūros ir juo tekančios srovės stiprio. Šis reiškinys gali būti aiškinamas papildomu Abrikosovo magnetinių sūkurių atsiradimu superlaidžiojo bandinio dalyje, lokalizuotoje bandinio centre tarp Π formos kanalo dalių, ir jų judėjimo ypatumais, nulemtais sūkurių prierašos jėgos nuo temperatūros kitimu superlaidžiojo bandinio dalyse, lokalizuotose šalia sūkurių kanalo.

Tolesni vykdytini eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai

Tolesniais tyrimais bus siekiama paaiškinti, kaip kinta ir nuo ko priklauso Y-Ba-Cu-O bandinių, turinčių superlaidžių sūkurių kanalą, voltamperinėse charakteristikose stebimų įtampos laiptelių plotis ir laiptelių forma. Tyrimais bus siekiama nustatyti, ar Abrikosovo magnetinių sūkurių prierašos jėga Y-Ba-Cu-O superlaidininko dalyse, lokalizuotose šalia sūkurių kanalo, atkartoja kritinės srovės tankio superlaidininko be kanalų priklausomybę nuo temperatūros.

Literatūra

- Abrikosov, A. A. 2004. Nobel lecture: type-II superconductors and the vortex lattice, *Reviews of Modern Physics* 76: 975–979. doi:10.1103/RevModPhys.76.975
- Jukna, A.; Abrutis, A.; Maneikis, A.; Balevičius, S.; Karlsson, U. O. 1999. Electric properties of contacts to HTS thin films at current densities $J > J_c$, *Journal of Low Temperature Physics* 117(5/6): 1555–1559. doi:10.1023/A:1022543111584
- Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Abrutis, A.; Li, X.; Wang, D.; Sobolewski, R. 2006. Electric transport properties of YBa₂Cu₃O_{7-x} thin-film bridges with laser-written channels of easy vortex motion, *Journal of Applied Physics* 99: 113902-1-5. doi:10.1063/1.2200595

- Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Abrutis, A.; Lie, X.; Wange, D.; Sobolewski, R. 2008. Easy vortex motion in an artificial channel of YBa₂Cu₃O_{7- δ} superconducting films, *Acta Physica Polonica* 113(3): 959–962.
- Pautrat, A.; Goupil, C.; Simon, Ch.; Charalambous, D.; Forgan, E. M.; Lazard, G.; Mathieu, P.; Brlet, A. 2003. Distribution of transport current in a type-II superconductor studied by small-angle neutron scattering, *Physical Review Letters* 90(8): 087002-1-4. doi:10.1103/PhysRevLett.90.087002
- Steponavičienė, L.; Šulcas, J.; Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Abrutis, A.; Sobolewski, R. 2009. Current-voltage dependences of YBa₂Cu₃O_{7- δ} superconducting thin films with laser-written channel of easy vortex motion, *Materials Science (Medžiagotyra)* 15(4): 291–295.
- Šulcas, J.; Steponavičienė, L.; Jukna, A.; Jung, G.; Plausinaitienė, V.; Abrutis, A.; Gong, M.; Sobolewski, R. 2011. Current distribution in Y-Ba-Cu-O superconducting microbridges containing Π -shaped channel for easy vortex motion, *Acta Physica Polonica A* 119(2): 183–185.
- Xie, X. M.; Chen, T. G.; Wu, Z. L. 1989. Oxygen diffusion in the superconducting oxide YBa₂Cu₃O_{7-x}, *Physical Review B* 40: 4549–4556. doi:10.1103/PhysRevB.40.4549
- Yuzhelevski, Y.; Jung, G.; Camerlingo, C.; Russo, M.; Ghinovker, M.; Shapiro, B. Ya. 1999. Current-driven vortex dynamics in a periodic potential, *Physical Review B* 60(13): 9726–9733. doi:10.1103/PhysRevB.60.9726

INVESTIGATION INTO SUPERCONDUCTING Y-BA-CU-O FILMS CONTAINING REGIONS OF WEAK SUPERCONDUCTIVITY AND BIASED AT $I \gg I_c$

J. Šulcas, A. Jukna

Abstract

Current distribution in YBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting thin film micro-bridges containing laser-written Π -shaped channel for easy vortex motion have been investigated in a narrow range of temperatures ranging from 85.7 to 90.2 K, which are below the critical temperature T_c of the material. In the range of the before mentioned temperatures the current-self magnetic field produced, Abrikosov magnetic vortices/anti-vortices appear in the partially deoxygenated ($x \sim 0.2$) channel and move coherently identifying itself as Josephson-like voltage “steps” in nonlinear current-voltage dependences. Bias current creates Lorentz force F_L , pushing vortices along the LW-channel from its edges towards the centre. As follows from current-voltage dependences, vortices start moving at $I = I_c$. This current already satisfies condition $F_L \gg F_p$ (where F_p – is pinning force in the film). Our results confirm that coherent vortex motion in the channel holds even at high biasing current when $I \sim 200I_c$. However, at these biasing currents, the width of voltage steps appears to be shorter than at lower current. This phenomenon has been explained by means of the onset of additional vortex motion in the laser untreated regions of the superconducting device. These regions are located in between the Π -shaped channel for easy vortex motion. Our results also demonstrate the possibility of investigating the electric properties of the mixed state superconductor by means of current dissipation due to the onset of coherent vortex motion.

Keywords: superconductors, thin films, critical current, magnetic vortex, superconducting channel, pinning force, Lorentz force.