

MAGNETINIŲ SŪKURIŲ KOHERENTINIO JUDĖJIMO $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERLAIĐZIUOSIUOSE PLONUOSIUOSE SLUOKSNIUOSE SU LAZERIU SUFORMUOTU II FORMOS SŪKURIŲ KANALU TYRIMAI, SLUOKSNIAIS TEKANT SROVEI $I \sim I_c$

Lina Steponavičienė¹, Artūras Jukna²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹step.lina@gmail.com; ²arturas.jukna@vgtu.lt

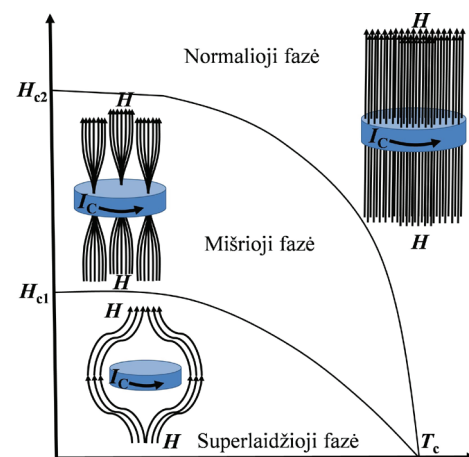
Santrauka. Darbe nagrinėjami silpnai tarpusavyje sąveikaujančių Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo ypatumai $0,3 \mu\text{m}$ storio, $100 \mu\text{m}$ ilgio ir $50 \mu\text{m}$ pločio $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superlaidžiuosiuose dariniuose, turinčiuose iš dalies deguonimi nuskurdintą II formos Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalą. Sūkurių kanalas superlaidžiajame darinyje sudarytas sufokusuotu į $5 \mu\text{m}$ skersmens dėmę lazerio spinduliu. Šviesos poveikiu modifikuotame superlaidžiojo darinio kanale ($x < 0,2$) atsirado papildomi sūkurių prieraišos centrai (deguonies vakansijos), kurių kuriama sūkurių prieraišos jėga F_p sumažino stiprių prieraišos centrų kuriama prieraišos jėgą ir sukūrė palankias sąlygas Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui, dariniu tekant srovei, kurios tankis keliomis eilėmis mažesnis už šviesa nmodifikuoto superlaidininko dalies kritinį srovės tankį. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad koherentinis Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas superlaidininke, eksperimentuose pasireiškiantis įtampos laipteliais voltamperinėje darinio charakteristikoje, gali atsirasti esant $F_L \gg F_p$ netgi tuomet, kai sūkurių kanalas nėra visiškai užpildytas Abrikosovo magnetiniais sūkuriais, dėl ko sūkuriai silpnai sąveikauja tarpusavyje.

Reikšminiai žodžiai: II rūšies superlaidininkas, kritinis magnetinis laukas, sūkurių prieraišos jėga, sūkurių prieraišos centrai, Lorencio jėga, Abrikosovo magnetinis sūkurys, sūkurių kanalas.

Sūkurių prieraišos jėgos samprata

Aukštatemperatūriai (ATS) II rūšies superlaidininkai naudojami kuriant modernius elektroninius prietaisus. Superlaidininkų savybės ir fazės (superlaidžioji, mišrioji, normalioji (t. y. nesuperlaidžioji) apibūdinamos kritiniais medžiagos parametrais: kritine temperatūra T_c , kritiniu magnetiniu lauku H_c ir kritiniu elektros srovės stipriu I_c . Kritine temperatūra vadinama maksimali temperatūra, kurioje superlaidininke išlieka superlaidžioji būseną. Pirmasis kritinis magnetinis laukas H_{c1} – tai lauko stipris, kuriam esant magnetinis laukas prasiskverbia į superlaidininką, suformuodamas jame mišriąją fazę (superlaidžiosios medžiagos dalyje atsiranda nesuperlaidžiosios sritys), o antrasis – H_{c2} , kuriam esant superlaidžiosios medžiagos savybės visai išnyksta. Kritinė elektros srovė I_c – maksimali srovė, galinti tekėti superlaidininku, esant fiksuotai temperatūrai $T < T_c$.

Mišrioji fazė II rūšies superlaidininkuose (1 pav.) atsiranda tuomet, kai į juos prasiskverbęs išorinis ar superlaidininku tekančios elektros srovės kuriamas magnetinis laukas viršija H_{c1} , tačiau neviršija H_{c2} . Mišrioji fazė pirmiausia atsiranda tose superlaidžiojo darinio vietose, kuriose darinio kritiniai parametrai minimalūs. Magnetinis laukas į superlaidininką įsiskverbia magnetinių Abrikosovo



1 pav. II rūšies aukštatemperatūrių superlaidininkų kritinių magnetinių laukų kokybinės priklausomybės nuo temperatūros

Fig. 1. The dependence of both critical magnetic fields of type-II superconducting materials vs. their temperature

sūkurių / antisūkurių pavidalu. Kiekvienas Abrikosovo magnetinis sūkurys / antisūkurys pagauna magnetinio lauko srauto kvantą $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ (Volger 1966; Van der Beek *et al.* 2002). Įvertinus medžiagos laisvąją

(Gibso) energiją pasirodo, kad II rūšies superlaidininkui sąveikaujant su stiprėjančiu magnetiniu lauku, energetiškai naudingiau sukurti didesnį skaičių magnetinių sūkurių, kuriais pagautas minimalus magnetinio lauko srauto dydis Φ_0 . Todėl, stiprėjant magnetiniam laukui, superlaidininke magnetinių Abrikosovo sūkurių / antisūkurių skaičius didėja.

Magnetinis Abrikosovo sūkurys / antisūkurys superlaidininke „prikimba“ prie įvairių medžiagos kristalinės struktūros ar cheminės sudėties defektų (t. y. prietaisų centrų), nes defektinėje superlaidininko srityje H_{c1} mažesnis nei srityje be defektų (Bhattacharya 1993). Kaip defektai gali būti superlaidžiojo darinio kristalinių sąaugų ribos, sraigtinės ar krašto dislokacijos, tuščiaidurės ertmės, deguonies vakansijos aukštatemperatūriuose superlaidininkuose, priemaišos ir kt. (Wördenweber 1999). Defektai, priklausomai nuo jų dydžio, sukuria Abrikosovo magnetiniam sūkuriui / antisūkuriui įvairaus stiprio prietaisų jėgą F_p . Superlaidininku tekant stipriai $I \gg I_c$ srovei, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai / antisūkuriai dėl jų tarpusavio magnetinės sąveikos susirikiuoja į trikampę magnetinę gardelę. Tuomet sūkurių / antisūkurių judėjimą superlaidininke lemia stipriausių prietaisų centrų kuriama sūkurių prietaisų jėga. Bendruoju atveju, atsižvelgiant į tai, kad sūkurių prietaisų centrai pasiskirstę atsitiktinai ir sūkurių / antisūkurių tankis atsitiktinis, sūkurių prietaisų jėga F_p superlaidininke yra kiekvieną iš sūkurių / antisūkurių veikiančios prietaisų jėgos suma (Wördenweber 1999): $F_p = \sum \left(\frac{f_p}{V} \right)$. Jei sąveika tarp magnetinių sūkurių stipresnė, nei sąveika tarp atskiro sūkurio su nuosavu prietaisų centru, tai atstumas tarp sūkurių gali būti apskaičiuotas iš sąryšio:

$$d = \left(\frac{\sqrt{3}\Phi_0}{2B} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Plonuosiuose superlaidininkų sluoksniuose sūkurių prietaisų savybes lemia konkurencija tarp atsitiktinai ir tvarkingai išsidėsčiusių prietaisų centrų, todėl, superlaidininkais tekant santykinai silpnai srovei ($I \sim I_c$), juose gali susikurti daug įvairių magnetinių sūkurių / antisūkurių gardelių konfigūracijų (Hornig *et al.* 2004). Siekiant kontroliuoti magnetinių sūkurių / antisūkurių atsiradimą ir jų judėjimą, kuriamos specialios prietaisų centrų geometrijos (Hornig *et al.* 2004), naudojant foto- ar elektroninę litografijas.

Šiame darbe Abrikosovo magnetinių sūkurių / antisūkurių prietaisų mechanizmą deguonimi nuskurdintame $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininke lemia deguonies vakansijos CuO_2 sluoksniuose (Wördenweber 1999). Dėl mažo koherentiškumo ilgio $\xi = 2,1$ nm (Nguyen *et al.* 1993) didelis skaičius deguonies vakansijų $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininke pasireiškia išplėstiniais defektais ir elgiasi kaip labai

efektyvūs sūkurių prietaisų centrai. Deguonies vakansija prilyginus ertmei, kurios skersmuo $D_v \ll \xi$, jos sąveikos jėgą su Abrikosovo magnetiniu sūkuriu / antisūkuriu galima būtų įvertinti prietaisų jėga f_p (Wördenweber 1999):

$$f_p \approx \left[\frac{10,2}{\left(1 + \frac{T}{T_c}\right)^4} \right] \cdot \left(\frac{B_c^2}{\mu_0 \xi} \right) \cdot \frac{\pi D_v^2}{4} \xi_0. \quad (2)$$

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ atveju $D_v \approx 0,29$ nm atitinka O^{2-} jono skersmenį superlaidininke, $B_c(T)$ vertės, esant temperatūrai $T < T_c$, gali kisti nuo 0,5 iki 1,5T, μ_0 – magnetinė pastovioji, $\xi_0 = 1,35 \xi(T \rightarrow 0)$. Temperatūrai mažėjant, sūkurių prietaisų jėga, kuriama deguonies vakansijomis, didėja. Įvertinus ją iš (2) formulės, $f_p(T = 78$ K) dydis gali kisti intervale nuo $1,7 \cdot 10^{-15}$ N iki $4 \cdot 10^{-14}$ N, o temperatūrai sumažėjus iki $T = 4,2$ K, nuo $6 \cdot 10^{-13}$ N iki $2 \cdot 10^{-11}$ N (Wördenweber 1999).

Esant stipriai sūkurių tarpusavio sąveikai (t. y. standžios magnetinės sūkurių gardelės atveju) ir atsitiktinai pasiskirsčiusiems prietaisų centrams (defektams), vidutinė prietaisų jėga deguonimi nuskurdintoje superlaidininko dalyje gali būti ypač maža (Wördenweber 1999). Didinant vakansijų tankį, prietaisų jėga f_p turėtų dar sumažėti.

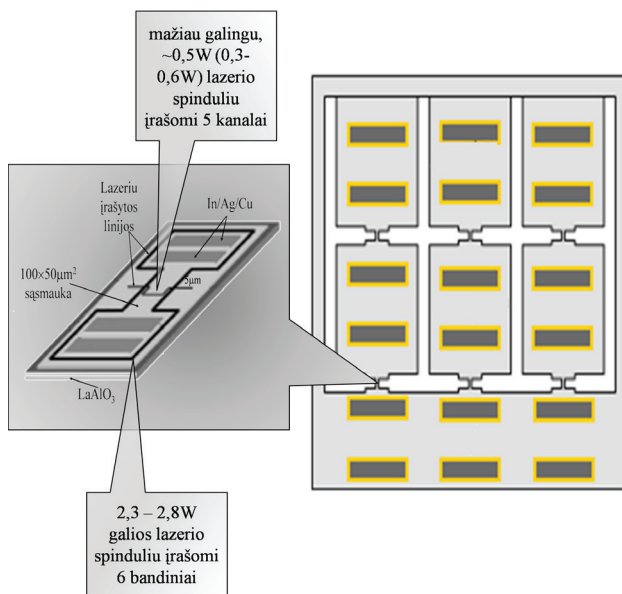
Lorencio jėgai $F_L = J \times B$ viršijus sūkurio prietaisų jėgą, sūkuriai pradeda judėti. Tuomet superlaidininke kartu pasireiškia ir stiprių, ir silpnų prietaisų centrų poveikis. Jame susiformuoja spontaniniai sūkurių kanalai, išilgai kurių sūkurių prietaisų jėga išlieka pastovi. Esant santykinai silpnai sūkurių prietaisų jėgai, sūkurių judėjimą sukelia silpna Lorencio jėga, t. y. tokio darinio kritinė superlaidininko srovė yra labai maža.

Superlaidžiųjų darinių technologija

Epitaksiniai superlaidieji $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniai buvo užauginti cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės (MOCVD) metodu. 2,3–2,8 W galios lazerio spinduliu, sufokusuotu į 5 μ m skersmens dėmę, sluoksniuose buvo suformuoti šeši 100 μ m ilgio ir 50 μ m pločio superlaidieji dariniai, kurių kiekvienas turėjo po dvi plačias elektrinių kontaktų aikšteles (2 pav.). Lazериu, kuris buvo azoto dujų apsuptyje, apšviestos superlaidininko dalys įkaista ir praranda deguonį ($x > 0,6$), tapdamos nesuperlaidžiomis net tada, kai temperatūra $T \ll T_c$.

Lazerio galią sumažinus iki (0,3÷0,6) W, penkiuose superlaidžiuosiuose dariniuose buvo suformuoti 5 μ m pločio, II formos kanalai (2 pav.).

Kanalų srityje esantis $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininkas sąveikos su šviesa metu buvo tik iš dalies nuskurdintas deguonimi, neviršijant $x \sim 0,2$ vertės.



2 pav. Lazerio spinduliu „įdegti“ šeši superlaidieji $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ pločio dariniai: penki su $5 \mu\text{m}$ pločio Π formos kanalais, skirtais Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui, o šeštasis – be kanalo, skirtas rezultatams palyginti

Fig. 2. Laser-patterned six $100\text{-}\mu\text{m}$ -long and $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ microbridges: five of them contain $5\text{-}\mu\text{m}$ -wide, Π -shaped channels for easy vortex motion and the sixth one was used as a reference sample

Šeštasis darinys buvo paliktas be kanalų. Jo tyrimų rezultatai buvo lyginami su darinių be kanalų rezultatais, siekiant suprasti, kaip kanalai veikia darinių elektrines savybes. Tyrimais nustatyta, kad darinio be kanalų kritinė medžiagos virsmo superlaidininku temperatūra $T_c^{\text{on}} = 91,2 \text{ K}$ (Jukna *et al.* 2005).

Superlaidžiojo kanalo srityje superlaidininką apibūdinantys kritiniai parametrai kinta: kritinė superlaidininko temperatūra sumažėja iki $T_{c0} = 86,2 \text{ K}$ (Jukna *et al.* 2005), taip pat keičiasi pirmasis kritinis superlaidininko magnetinis laukas H_{c1} (čia neparodyta), lyginant juos su šviesa nedomifikuotomis superlaidininko dalimis. Todėl, superlaidininku tekant srovei, sūkurių kanalo srityje pirmiausia ir atsiranda Abrikosovo magnetiniai sūkuriai, o srovei viršijus I_c vertę, sūkuriai joje pradeda judėti. Sūkurių judėjimas pasireiškia energijos nuostoliais voltamperinėse charakteristikose, atspindėtais elektrinės įtampos, proporcingos sūkurių skaičiui ir jų tankiui (Steponavičienė *et al.* 2009, 2011).

MOCVD būdu užaugintuose YBCO superlaidininkuose gausu sraiginių dislokacijų, kurių kuriama prietaisų jėga gerokai stipresnė nei deguonies vakansijų. Lazerio spinduliu modifikuotose superlaidžiojo kanalo dalyse sukuriama papildomos deguonies vakansijos, mažinančios sraiginių dislokacijų veiksmingumą (Van der Beek *et al.* 2002). Todėl sūkurių kanale gali susidaryti palankos sąlygos sūkurių tėkmei ir jų koherentiniam judėjimui (Jukna *et al.* 2005, 2008).

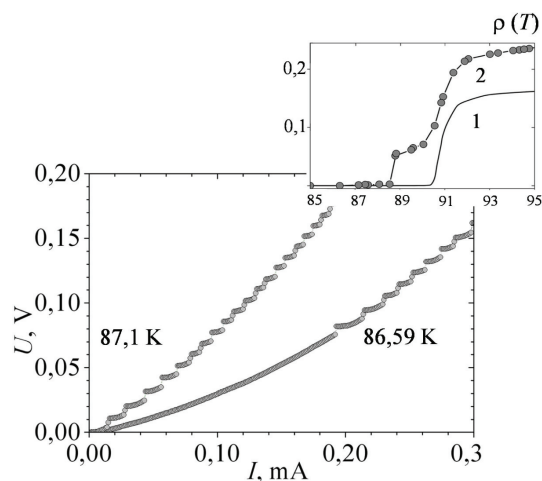
Problema

Darbe tiriami koherentinio Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo ypatumai, stebimi superlaidininkų voltamperinėse charakteristikose elektrinės įtampos laiptelių pavidalu (Yuzhelevski *et al.* 1999; Jukna *et al.* 2005). Koherentinis sūkurių judėjimas tiriamuosiuose dariniuose vyksta lazeriu sudarytais sūkurių kanalais. Kiekvienos papildomos sūkurio / antisūkurio poros atsiradimas kanale lemia papildomo įtampos / srovės laiptelio atsiradimą voltamperinėje superlaidžiojo darinio charakteristikoje (Jukna *et al.* 2008; Kuriki *et al.* 2000; Ohshima *et al.* 2003; Pedyash *et al.* 1995).

Tyrimo tikslas – ištirti Abrikosovo magnetinių sūkurių / antisūkurių judėjimo ypatumus, superlaidžiuoju dariniu tekant silpnai ($I \sim I_c$) srovei, esant fiksuotai darinio temperatūrai siaurame temperatūrų intervale nuo $87,3$ iki $86,6 \text{ K}$.

Iš ankstesnių eksperimentinių tyrimų rezultatų (Jukna *et al.* 2005, 2008) padaryta išvada, kad magnetiniai Abrikosovo sūkuriai $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superlaidžiajame darinyje, turinčiame Π formos sūkurių kanalą, gali judėti koherentiškai.

Išvadą patvirtina varžos nuo temperatūros priklausomybės ir voltamperinių charakteristikų eigos (3 pav.), kuriose stebimi elektros įtampos laipteliai buvo susieti su magnetinių Abrikosovo sūkurių / antisūkurių atsiradimu ir judėjimu išilgai kanalo.



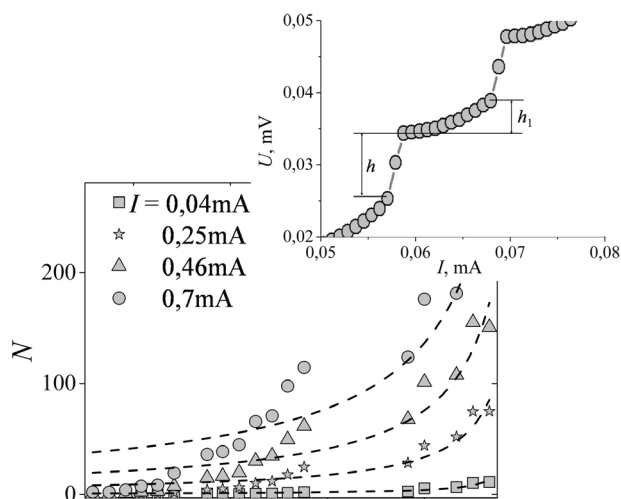
3 pav. Voltamperinės charakteristikos $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superlaidžiųjų darinių, esant $T = 86,59 \text{ K}$ ir $T = 87,1 \text{ K}$. Įklajoje pademonstruota $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ darinių savitosios elektrinės varžos priklausomybė nuo temperatūros, tekant $1 \mu\text{A}$ stiprio srovei: (1) dariniu be kanalo ir (2) dariniu, kuriame lazeriu suformuotas Π formos sūkurių kanalas

Fig. 3. I - V dependences of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ microbridges at temperatures $T = 86.59 \text{ K}$ and $T = 87.1 \text{ K}$. Inset demonstrates resistivity vs. temperature dependence of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ devices: (1) – reference device; (2) – the device containing LW channel for easy vortex motion

Darbo rezultatai ir jų aptarimas

Bandiniu tekanti srovė sukuria Lorencio jėgą, verčiančią magnetinius Abrikosovo sūkurius / antisūkurius judėti išilgai kanalo statmena elektros srovei kryptimi. Sūkurių judėjimo nulemti energijos nuostoliai eksperimentiškai stebimi elektrine varža voltamperinėse (I - V) charakteristikose. Jose atsiradę įtampos laipteliai susiję su sūkurio / antisūkurio poros atsiradimu ir sūkurių judėjimo greičiu (Steponavičienė *et al.* 2009).

Iš voltamperinės charakteristikos laiptelių galima įvertinti magnetinių Abrikosovo sūkurių / antisūkurių skaičiaus priklausomybę nuo temperatūros $N(T)$ (4 pav.). Nustatyta, kad sūkurių skaičius kanale ir jo kitimas priklausomai nuo temperatūros, atvirkščiai proporcingas sūkurio kondensacijos energijos superlaidininke kitimui pagal temperatūrą (Steponavičienė *et al.* 2009).



4 pav. Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičiaus priklausomybės nuo temperatūros $N(T)$, apskaičiuotos iš superlaidžiojo $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ darinio voltamperinių charakteristikų, išmatuotų nesant išorinio magnetinio lauko. Punktyrinė linija vaizduoja sūkurių kondensacijos energijos priklausomybės eigą nuo temperatūros. Įklajoje: įtampos laipteliai, stebimi $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ dariniu su Π formos kanalu voltamperinėje charakteristikoje. Laiptelis sudarytas iš h aukščio sparčiosios dalies, susijusios su sūkurio / antisūkurio poros atsiradimu ir h_1 – aukščio lėtosios dalies, susijusios su jos judėjimo greičio kitimu, stiprėjant elektros srovei, tekančiai superlaidžiuoju dariniu

Fig. 4. Vortex density vs. temperature dependence $N(T)$ estimated from I - V dependences of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ device at zero external magnetic field. Dashed-lines represent the best fit of the inverse of the condensation energy of a flux line vs. temperature. The inset shows a fragment of I - V dependence and “quasi”-Josephson steps measured for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ device at temperature $T = 86.93$ K. Any of steps consists of “quick-rise” part h related to the entrance of an additional vortex-antivortex pair into the channel area and of “slow-rise” part h_1 related to an increase in the velocity of vortices vs. biasing current increase in the superconducting microbridge

Atidžiau įsižiūrėjus į įtampos / srovės laiptelius voltamperinėje charakteristikoje, galima pastebėti, kad dariniu tekant santykinai silpnai elektros srovei $I \sim I_c$ kiekvienas įtampos laiptelis sudarytas iš statesnės dalies h , susijusios su papildomos sūkurio / antisūkurio poros atsiradimu, ir lėkštesnės dalies h_1 , susijusios su elektros srovės nulemtu sūkurių greičio kitimu. Silpnų srovių atveju įtampos laiptelio aukštis h nepriklauso nei nuo darinio temperatūros tirtame temperatūrų intervale, kuriame pasireiškia koherentinis magnetinių Abrikosovo sūkurių judėjimas, nei nuo dariniu tekančios srovės stiprio. Tuo tarpu srovei stiprėjant ir darinio temperatūrai didėjant, laiptelio lėkštesnės dalies aukštis h_1 mažėja, kol srovei pasiekus $I \sim 2I_c$, – visai išnyksta.

Iš varžos priklausomybės nuo temperatūros įvertinus superlaidininko prarastą deguonies kiekį ($x \sim 0,2$) (Jukna *et al.* 2008), galima daryti prielaidą, kad mažo skersmens deguonies vakansijos superlaidininko kristalinėje struktūroje turėtų būti superlaidininke išsidėsčiusios ne toliau nei kas ketvirtame penktame perovskito struktūros superlaidininko kristalo narvelyje.

Šis atstumas palyginamas su Abrikosovo magnetinių sūkurių / antisūkurių matmenimis. Todėl galima daryti prielaidą, kad deguonies vakansijų tankis sūkurių kanale gali sudaryti ne taškinis, bet išplėstinius superlaidininko kristalinės struktūros defektus ir sūkuriams / antisūkuriams sukurti kolektyvinę sūkurių prieraišos jėgą (Wördenweber 1999). Pažymėtina tai, kad temperatūrai mažėjant deguonies vakansijų kuriama sūkurių prieraišos jėga didėja (Wördenweber 1999).

Todėl galima daryti prielaidą, kad superlaidininkui praradus $x \sim 0,2$ dalį deguonies, sraiginių dislokacijų indėlis į sūkurių prieraišos jėgą gali susilyginti su deguonies vakansijų kuriama prieraišos jėga. Taigi net ir santykinai silpnos elektros srovės atveju $I \sim I_c$ (t. y. esant santykinai silpnai Lorencio jėgai) bus tenkinama sąlyga $F_L \gg F_p$, o superlaidžiajame kanale Abrikosovo magnetiniai sūkuriai / antisūkuriai kanale juda be jokio pasipriešinimo.

Elektros srovei tekant superlaidžiuoju dariniu, kuriame lazeriu suformuotas Π formos magnetinių sūkurių kanalas, magnetiniai sūkuriai atsiranda superlaidžiojo kanalo viename krašte, o antisūkuriai – kitame. Lorencio jėgai viršijus sūkurių prieraišos jėgą, sūkuriai pradeda judėti, tačiau jie gali anihiliuoti tik viršutinėje kanalo dalyje, kur sutinka savo antipodus. Pirmojo įtampos laiptelio atsiradimas superlaidžiojo darinio voltamperinėje charakteristikoje (žr. 3 pav.) patvirtina, kad magnetinių sūkurių kanale koherentiniam judėjimui jau sukurtos palankios sąlygos (Jukna *et al.* 2005, 2008). Koherentinis Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas gali atsirasti tuomet, jei superlaidžiojo darinio krašte

sūkurio / antisūkurio atsiradimo laikas susilygina su jų lėkio laiku iki anihilacijos linijos (Yuzhelevski *et al.* 1999). Tai reiškia, kad koherentinis sūkurių judėjimas fiksuoto pločio superlaidžiajame darinyje gali atsirasti tik esant tam tikrai F_L vertei ir išnykti, kai ta sąlyga netenkinama.

Iš superlaidžiojo darinio su Π formos kanalu voltamperinių charakteristikų (žr. 3 pav.) galima pamatyti, kad aukštesnėje temperatūroje (87,1 K) koherentinis sūkurių / antisūkurių judėjimas gali prasidėti vos srovei pasiekus kritinę superlaidininko srovės vertę I_c . Tai reiškia, kad ypač mažos sūkurių prieraišos jėgos atveju, magnetiniai sūkuriai gali judėti koherentiniu judėjimu netgi labai silpnų srovių (magnetinių laukų) atveju, kai tenkinama sąlyga $F_L \gg F_p$. Silpnų srovių atveju kanale atsiranda $N = B / \Phi_0$ skaičius sūkurių / antisūkurių porų, kuris tiesiai proporcingas srovės kuriamo magnetinio lauko indukcijai. Silpnos elektros srovės atveju viršutinėje kanalo srityje atsiranda vos keletas magnetinių sūkurių / antisūkurių, tarp kurių atstumas apibrėžiamas iš (1) formulės. Tačiau tarp sukurtųjų magnetinių sūkurių / antisūkurių atsiranda stipri magnetinė sąveika (ypač mažos sūkurių prieraišos jėgos atvejis), lemianti koherentinį magnetinių sūkurių / antisūkurių judėjimą. Šį rezultatą patvirtina superlaidžiųjų darinių, turinčių Π formos kanalą, voltamperinės charakteristikos (3 pav.), kuriose, esant $T = 87,1$ K temperatūrai, koherentinis sūkurių judėjimas stebimas superlaidžiuoju dariniu tekant santykinai silpnai ($I \sim I_c$) srovei.

Išvados

Abrikosovo magnetinių sūkurių / antisūkurių skaičius ir jų koherentinis judėjimas (t. y. stipriai tarpusavyje sąveikaujančių sūkurių judėjimas) stebimas superlaidžiuosiuose dariniuose su lazeriu suformuotais Π formos magnetinių sūkurių kanalais. Koherentinis sūkurių judėjimas eksperimentuose pasireiškia elektros įtampos laipteliais superlaidžiųjų darinių voltamperinėse charakteristikose.

Iš voltamperinių charakteristikų, išmatuotų superlaidžiuosiuose dariniuose, turinčiuose Π formos sūkurių kanalą, galima įvertinti, kad deguonimi nuskurdintoje superlaidininko dalyje sūkurių prieraišos jėga yra ypač maža, o Lorencio jėga viršija sūkurių prieraišos jėgą esant elektros srovei $I \sim I_c$. Todėl vos sūkuriams pajudėjus, superlaidžiajame kanale gali atsirasti spontaniniai sūkurių kanaliukai, kuriais magnetiniai sūkuriai juda koherentiškai.

Deguonies vakansijų kuriama prieraišos jėga superlaidžiajame kanale didėja, mažėjant superlaidžiojo darinio temperatūrai. Kokiu dėsningumu sūkurių prieraišos jėga priklauso nuo temperatūros, bus tirama kitame darbe.

Tolesni tyrimai

Tolesniais tyrimais bus siekiama nustatyti, kaip magnetiniai Abrikosovo sūkuriai juda spontaniniais kanalais ir kokiu dėsningumu sūkurių prieraišos jėga, kuriama $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininke deguonies vakansijomis, priklauso nuo temperatūros.

Literatūra

- Bhattacharya, S.; Higgins, M. J. 1993. Dynamic of a disordered flux line lattice, *Physical Review Letters* 70(17): 2617–2620. doi:10.1103/PhysRevLett.70.2617
- Hong, L.; Wu, J. C.; Kang, P. C.; Wu, T. C.; Yang, T. J. 2004. Matching effect and flux pinning force in a Nb superconducting thin film with a triangular lattice of artificial pinning centers, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (272–276): e1107–e1108.
- 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
- Jukna, A.; Barboy, G.; Jung, G.; Abrutis, A.; Wang, X.; Li, D.; Sobolewski, R. 2008. Easy vortex motion in an artificial channel of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconducting films, *Acta Physica Polonica A* 113(3): 959–962. doi:10.1063/1.2128481
- Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Banerjee, S. S.; Myasoedov, Y.; Plaušinitienė, V.; Abrutis, A.; Wang, X.; Li, D.; Sobolewski, R. 2005. Laser processed channels of easy vortex motion in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ films, *Applied Physics Letters* 87: 192504–192506.
- Kuriki, S.; Hirano, S.; Maeda, A.; Kiss, T. 2000. Vortices in high-Tc superconductors, *Topics in Applied Physics* 91: 5–52. doi:10.1007/978-3-540-44876-1_2
- Nguyen, P. P.; Wang, Z. H.; Rao, A. M.; Dresselhaus, M. S.; Moodera, J. S.; Dresselhaus, G.; Radousky, H. B.; Glass, R. S.; Liu, J. Z. 1993. Transport and magnetic properties of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ brysingle crystals, *Phys. Rev. B* 48(2): 1148–1155. doi:10.1103/PhysRevB.48.1148
- Ohshima, S.; Tanabe, K.; Morishita, T.; Tonouchi, M. 2003. Observation of vortices, *Topics in Applied Physics* 91: 53–102. doi:10.1007/978-3-540-44876-1_3
- Pedyash, M. V.; Gerritsma, G. J.; Blank, D. H. A.; Rogalla, H. 1995. Coherent vortex motion in superconducting nano-bridges based on $YBaCuO$ thin films, *IEEE Transactions on Electron Devices* 5(2): 1387–1390.
- Steponavičienė, L.; Šulcas, J.; Jukna, A.; Jung, G.; Plaušinitienė, V.; Abrutis, A.; Maneikis, A.; Gong, M.; Sobolewski, R. 2011. Investigation of vortex density in laser-written, P-shaped channels of YBCO bridge by means of current voltage dependences, *Acta Physica Polonica A* 119(2): 180–182.
- Steponavičienė, L.; Šulcas, J.; Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Abrutis, A.; Sobolewski, R. 2009. Current-voltage dependences of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconducting thin films with laser-written channel of easy vortex motion, *Materials Science* 15(4): 291–295.
- Van der Beek, C. J.; Konczykowski, M.; Abal'oshev, A.; Abal'osheva, I.; Gierlowski, P.; Lewandowski, S. J.;

Indenbom, M. V.; Barbanera, S. 2002. Strong pinning in high-temperature superconducting films, *Physical Review B* 66: 024523. doi:10.1103/PhysRevB.66.024523

Volger, J. 1966. Progress in superconductivity, *IEEE Transactions on Magnetism* Mag-2(3): 159–164. doi:10.1109/TMAG.1966.1065888

Wördenweber, R. 1999. Mechanisms of vortex motion in high-temperature superconductors, *Reports on Progress in Physics* 62(2): 187–236. doi:10.1088/0034-4885/62/2/003

COHERENT VORTEX MOTION IN $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ SUPERCONDUCTING THIN FILMS CONTAINING II-SHAPED CHANNEL FOR EASY VORTEX MOTION BIASED AT $I \sim I_C$

L. Steponavičienė, A. Jukna

Abstract

The current vs. voltage dependences of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting microbridges containing laser-written (LW) II-shaped channel for easy vortex motion have been investigated in a narrow range of temperatures ranging from 87.3 to 88.6 K that are still 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 satisfies condition $F_L \gg F_p$ (where F_p – is pinning force in the film). Our results confirm that oxygen vacancies in the channel area decrease the pinning force of screw-dislocations and make the channel of uniform pinning. Then, even at $I = I_C$, Abrikosov magnetic vortices create a spontaneous channel in the deoxygenated channel of the superconducting microbridge and start moving coherently.

Keywords: II-type superconductor, thin film, critical magnetic field, vortex channel, coherence length, pinning force, pinning center, Lorentz force.