VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Lina STEPONAVIČIENĖ

MAGNETINIŲ SŪKURIŲ JUDĖJIMO $YBa_2Cu_3O_{7-X}$ SUPERLAIDŽIŲ SLUOKSNIŲ KANALAIS TYRIMAS IR VALDYMAS

DAKTARO DISERTACIJA

FIZINIAI MOKSLAI,
FIZIKA (02P),
KONDENSUOTOS MEDŽIAGOS: ELEKTRONINĖ STRUKTŪRA, ELEKTRINĖS, MAGNETINĖS IR OPTINĖS SAVYBĖS, SUPERLAIDININKAI, MAGNETINIS REZONANSAS, RELAKSACIJA, SPEKTROSKOPIJA (P260)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Artūras JUKNA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
fiziniai mokslai, fizika – 02P).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2171-M mokslo literatūros knyga
http://leidykla.vgtu.lt

ISBN 978-609-457-563-1

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2013
© Lina Steponavičienė, 2013
step.lina@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Lina STEPONAVIČIENĖ

INVESTIGATION AND CONTROL OF MOTION OF MAGNETIC VORTICES IN THE THIN SUPERCONDUCTING $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ FILMS

DOCTORAL DISSERTATION

PHYSICAL SCIENCES,
PHYSICS (02P),
CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE;
ELECTRICAL, MAGNETIC AND OPTICAL PROPERTIES;
SUPERCONDUCTORS; MAGNETIC RESONANCE;
RELAXATION; SPECTROSCOPY (P260)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

prof. dr. Artūras JUKNA (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Reziumė

Disertacijoje ištirti ploni $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininko sluoksniai, kuriuose lazeriu suformuoti dariniai, turintys silpnojo superlaidumo sritis. Mokslinių tyrimų objektas – mišrioji $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininko fazė. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti ir paaiškinti $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiųjų darinių elektrines ir magnetines savybes, jais tekant elektros srovei, kurios stipris viršija superlaidininko kritinės srovės stiprį, darinių temperatūrai esant žemesnei nei kritinė superlaidininko medžiagos temperatūra.

Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai: MOCVD būdu užaugintuose superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ plonuosiuose sluoksniuose lazeriu suformuoti superlaidžiuosius darinius ir ištirti silpnojo superlaidumo srities elektrines ir magnetines savybes, dariniu tekant nuostoviajai elektros srovei. Iš elektrinės energijos nuostolių kitimo dėsningumų, paaiškinti sąlygas, kurioms esant atsiranda mišrioji medžiagos būsena, siekiant prognozuoti būsenos nepageidaujamą, atsitiktinį atsiradimą ir vystymąsi.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendros išvados, cituotos literatūros ir disertacijos autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašomos tyrimų metodikos, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmasis disertacijos skyrius skirtas literatūros analizei. Jame nagrinėjamas superlaidumo reiškinys, superlaidžios medžiagos, jų kritiniai parametrai, fazės, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai ir koherentinis jų judėjimas, prieraišos mechanizmai.

Antrajame disertacijos skyriuje aprašoma $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksnių ir darinių gamybos technologija.

Trečiajame skyriuje pateikiami superlaidžiųjų $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių, turinčių lazerio spinduliuote suformuotas silpnojo superlaidumo sritimis, elektrinių ir magnetinių savybių tyrimų rezultatai. Aiškinami superlaidžiųjų darinių mišriosios fazės elektrinių savybių tyrimų rezultatai. Tiriamas Abrikosovo magnetinių sūkurių tankis bei jų koherentinis judėjimas silpnojo superlaidumo sritimis.

Tyrimų rezultatai buvo pristatyti vienuolikoje mokslinių konferencijų, svarbiausi tyrimų rezultatai pateikti penkiose mokslinėse publikacijose.

Abstract

The present thesis explores superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films containing laser-formed regions of weak superconductivity. The object of the research is the mixed-state type-II superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. The aim of this work is to study and explain the electrical and magnetic properties of mixed-state, dc-biased superconducting devices with currents exceeding the critical current of the superconductor at $T < T_c$ of the superconducting material. The Ph D thesis focuses on the following objectives: to fabricate superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ devices containing regions of weak superconductivity by means of laser-pattering/writing technique out of the $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin superconducting films manufactured by MOCVD method. To study electric and magnetic properties of these devices biased with direct current which strength is greater than the critical current of the superconducting material and based on analysis of experimentally estimated electric losses to explain the conditions under which the mixed-state in the material appears and how it develops. The main purpose of this research is to find a way how to predict and control randomly appearance and motion of Abrikosov magnetic vortices in the mixed-state superconducting devices.

The dissertation comprises an introduction, three chapters, conclusions, the cited references, and the author's scientific publications on the subject.

The introductory chapter includes the research problem and the significance of the study on the thesis, the object of research, the aims and objectives, the prevailing research methodology, its scientific novelty, the practical significance of the examined results, and the defended statements.

The first chapter is devoted to literature review.

The second chapter describes the superconducting thin films growing and research techniques.

The third chapter endows with the results achieved after the exploration of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ layers and devices. This chapter provides evidence that the magnetic field the penetrates via the areas of weak superconductivity in the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ by means of Abrikosov magnetic vortices. This chapter shows how we can control coherent motion in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductors, in the areas of weak superconductivity, by means of Abrikosov magnetic vortices.

The main findings were discussed at eleven scientific conferences. The main research results are presented in five scientific publications.

Žymėjimai

Simboliai

η – klampos koeficientas;

ξ – koherentiškumo ilgis superlaidininke;

ξ – koherentiškumo ilgis;

λ – magnetinio lauko prasiskverbimo į superlaidininką gylis;

μ_0 – magnetinė konstanta;

Φ_0 – magnetinio srauto kvantas;

$\xi_{ab}(0)$ – koherentiškumo ilgis *a–b* plokštumoje superlaidininke $T \to 0$ K;

$\lambda_{ab}(0)$ – magnetinio lauko prasiskverbimo į superlaidininką gylis *a ar b* plokštumoje $T \to 0$ K;

A – tapatinimo parametras;

a – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių pagreitis;

B – magnetinio lauko indukcija;

B_0 – išorinio magnetinio lauko indukcija;

$B_x(z)$ – magnetinio lauko indukcija z koordinatės kryptimi;

d – atstumas tarp magnetinių Abrikosovo sūkurių/antisūkurių;

E – Abrikosovo magnetino sūkurio kondensacijos energija;

E_0 – didžiausia Abrikosovo magnetino sūkurio kondensacijos energija;

F_L – Lorenco jėga;

F_P – Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos jėgos tankis;

f_P – prieraišos jėga, veikianti Abrikosovo magnetinį sūkurį ir antisūkurį;

H – magnetinio lauko stipris;

H_{c1} – pirmasis kritinio magnetinio lauko stipris;

H_{c2} – antrasis kritinio magnetinio lauko stipris;

I – elektros srovės stipris, tekantis bandinyje;

I_{40}, I_{100} – elektros srovės stipris, kuriantis 40 ir 100 Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų;

I_c – kritinis elektros srovės stipris;

I_S – superlaidžios elektros srovės stipris;

J – elektros srovės tankis;

J_c – kritinis superlaidininko elektros srovės tankis;

L – atstumas tarp elektrinių kontaktų;

l – superlaidaus sluoksnio storis;

m – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių „efektinė masė“;

N – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius;

R – superlaidaus darinio elektrinė varža;

R_{12}, R_{23}, R_{34} – superlaidaus darinio tam tikros dalies elektrinės varžos;

R_{ap} – apkrovos elektrinė varža;

R_{k1}, R_{k2}, R_{k3}, R_{k4} – superlaidaus darinio kontaktų dalies elektrinės varžos;

S – Abrikosovo magtnetinio sūkurio plotas;

T_c – kritinė superlaidininko temperatūra;

U – elektrinė įtampa;

U_h – elektrinės įtampos laiptelio dalis, susijusi su Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių naujos poros įsiskverbimu;

U_{h1} – elektrinės įtampos laiptelio dalis, susijusi su Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimo greičiu;

U_{st} – elektrinė vieno laiptelio įtampa;

v – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių greitis;

V – superlaidininko tūris;

w – superlaidaus sluoksnio plotis;

x – vidutinis deguonies atomų vakansijų skaičius kristalinės gardelės narvelyje;

z – koordinatė.

Santrumpos

ATS – aukštatemperatūriai superlaidininkai;

EDS – energijos dispersinės spektroskopijos sistema;

YBCO – II rūšies superlaidininkas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$;

MOCVD – cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės metodas;

STM – skenuojantis tunelinis mikroskopas.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 3
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 4
Tyrimų metodikos 4
Darbo mokslinis naujumas 4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 5
Ginamieji teiginiai 5
Darbo rezultatų aprobavimas 6
Disertacijos struktūra 6

1. SUPERLAIDUMO REIŠKINYS ANTROSIOS RŪŠIES SUPERLAIDININKUOSE . 7
1.1. Superlaidumo atradimas 7
1.2. Aukštatemperatūrių superlaidininkų savybės 9
1.3. Aukštatemperatūrių superlaidininkų mišri fazė ir Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai 13
1.4. Sąlygos Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentiniam judėjimui atsirasti 18
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 20

2. $YBA_2CU_3O_{7-X}$ SUPERLAIDŽIŲJŲ PLONŲJŲ SLUOKSNIŲ AUGINIMO IR TYRIMO BŪDAI 23
2.1. Aukštatemperatūrio superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ savybės 24
2.2. Injekcinis impulsinis cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės metodas 25
2.3. Superlaidžių darinių formavimas lazeriu 26
2.4. Lazeriu suformuotų superlaidžių darinių paviršiaus ir cheminės sudėties tyrimai 29
2.4.1. Skenuojantis tunelinis mikroskopas 29
2.4.2. Skenuojantis elektroninis mikroskopas su Rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopine sistema 30
2.5. Elektrinių kontaktų formavimas 31
2.6. Elektriniai matavimai 31
2.6.1. Elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros matavimai 32
2.6.2. Kontaktinės varžos matavimai 33
2.7. Antrojo skyriaus išvados 33

3. ABRIKOSOVO MAGNETINIAI SŪKURIAI $YBA_2CU_3O_{7-X}$ SUPERLAIDŽIUOSE DARINIUOSE 35
3.1. Superlaidūs $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniai, turintys silpnojo superlaidumo sritis 35
3.2. Abrikosovo magnetinių sūkurių tankio ir koherentinio judėjimo tyrimas 44
3.2.1. Voltamperinės charakteristikos elektrinės įtampos laiptelio analizė 44
3.2.2. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių tankis 51
3.2.3. Abrikosovo magnetinių sūkurių plotas 53
3.2.4. Kritinės elektros srovės tankio priklausomybės nuo temperatūros tyrimas . 55
3.2.5. Savitosios elektrinės varžos priklausomybės nuo elektros srovės stiprio tyrimas 57
3.2.6. Elektros srovės stiprio, kuriančio fiksuotą Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičių, priklausomybė nuo temperatūros 58
3.3. Trečiojo skyriaus išvados 61

BENDROSIOS IŠVADOS 63

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 65

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 71

Contents

INTRODUCTION 1
Topicality of the problem 1
Relevance of the thesis 2
The object of the research 3
Aim of the work 3
Task of the work 4
Methodology of research 4
Scientific novelty 4
Practic value 5
Defended propositions 5
Sanctions of the results 6
Structure of the dissertation 6

1. THE SUPERCONDUCTIVITY PHENOMENON IN TYPE II SUPERCONDUCTORS 7
1.1. The discovery of superconductivity 7
1.2. Properties of the high – temperature superconductors 9
1.3. Mixed phase of second type of superconductors 13
1.4. Conditions suitable for Abrikosov magnetic vortices coherential movement 18
1.5. Conclusions of the first chapter and task formulation 20

2. METODS OF THE PRODUCTION AND TESTING OF THE $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ SUPERCONDUCTING THIN FILMS 23
2.1. Properties of the high – temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 24
2.2. Pulsed injection Metal – Organic Chemical Vapour Deposition method 25
2.3. Laser formation of superconduction devices 26

2.4. Study of superconductive laser - formed structures surface and chemical composition 29
2.4.1 Scanning tunneling microscope 29
2.4.2. scanning tunneling microscope with EDS 30
2.5. Formation of electrical contacts 31
2.6. Electrical measurements 31
2.6.1. Measurements of electrical resistivity versus temperature 32
2.6.2. Contact resistance measurements 33
2.7. Conclusions of the second chapter 33

3. ABRIKOSOV MAGNETIC VORTICES IN WEAK SUPERCONDUCTIVITY AREAS IN SUPERCONDUCTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ DEVICE 35
3.1. Superconductors $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ devices with weak superconductivity areas 35
3.2. Abrikosov magnetic vortex density and motion analysis in superconductive $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ devices 44
3.2.1. Analysis of the step of voltage – current dependence 44
3.2.2. The density of Abrikosov magnetic vortex and antivortex 51
3.2.3. The area of Abrikosov magnetic vortex 53
3.2.4. Analysis of critical current density dependence on temperature 55
3.2.5. Analysis of electrical resistivity dependence on the electric current 57
3.2.6. The electric current which creates fixed vortex – antivortex pairs versus temperature 58
3.3 Conclusions of the third chapter 61

GENERAL CONCLUSIONS 63

LITERATURE AND REFERENCES 65

LIST OF PUBLISHED WORKS OF THE TOPICS OF THE DISSERTATION 71

Įvadas

Problemos formulavimas

Aukštatemperatūrių II rūšies superlaidininkų savybes ir fazes apibūdina kritiniai medžiagos parametrai, t. y. kritinė temperatūra T_c, pirmasis H_{c1} ir antrasis H_{c2} kritiniai superlaidininko magnetiniai laukai ir kritinis superlaidininko elektros srovės stipris I_c. Disertacijoje nagrinėjama mišri superlaidininko medžiagos fazė, atsirandanti, kai tiriamojo darinio temperatūra T žemesnė už kritinę temperatūrą T_c ir dariniu teka kritinis elektros srovės stipris I_c, kuris kuria magnetinio lauko stiprį H intervale $H_{c1} \leq H \leq H_{c2}$.

Magnetinis laukas į II rūšies superlaidininką prasiskverbia mišrioje fazėje Abrikosovo magnetiniais sūkuriais. Šiame darbe nagrinėjami reiškiniai, vykstantys superlaidžiajame $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ plonajame sluoksnyje dirbtinai sukurtuose Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo kanaluose. Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalai – tai silpnojo superlaidumo sritys, kuriose žemesnė T_c, mažesnis I_c ir silpnesnis H_{c1} likusios darinio dalies atžvilgiu. Tokias silpnojo superlaidumo sritis $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidininke galima sukurti, medžiagą pakaitinus inertinių dujų aplinkoje, esant temperatūrai, kurioje vyksta deguonies difuzija. Modifikuotose superlaidžiose medžiagos srityse yra santykinai mažesnis deguonies kiekis, lyginant jį su nemodifikuotomis superlaidžiojo darinio sritimis. Šiose srityse medžiagos defektai (deguonies vakansijos ir

sraigtinės dislokacijos) kuria magnetinių sūkurių prieraišos jėgą. Elektros srovė indukuoja Lorenco jėgą, kuri verčia į superlaidžiojo sluoksnio silpnojo superlaidumo sritis prasiskverbusius Abrikosovo magnetinius sūkurius judėti statmenai elektros srovei nuo vieno superlaidžiojo darinio krašto, o antisūkurius nuo kito krašto link darinio vidurio linijos ir ten anihiliuoti.

Disertacijoje atlikti $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiųjų plonųjų sluoksnių elektrinių savybių tyrimai, ieškant metodų, kuriais galima įvertinti:

1. Abrikosovo magnetinių sūkurių tankį darinyje, juo tekant fiksuoto stiprio elektros srovei.
2. Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo ypatumus ir dėl sūkurių judėjimo atsirandančius energijos nuostolius darinyje, kai juo tekančios srovės stipris $I > I_c$.
3. Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos jėgos kitimo, silpnojo superlaidumo srityje, priklausomybę nuo darinio temperatūros, juo tekant elektros srovei, kurios stipris $I > I_c$.

Darbo aktualumas

Šiuo metu žinoma per tūkstantis superlaidžiosiomis savybėmis pasižyminčių metalų, jų lydinių, paprastų ir sudėtingų cheminių junginių, taip pat ir organinių medžiagų. Superlaidininkų pagrindiniai pritaikymai šiuolaikiniame technikos amžiuje susiję su modernių technologijų ir ypač jautrių prietaisų kūrimu. Pavyzdžiui, aukštatemperatūriai superlaidininkai pirmiausia buvo pritaikyti elektros energijos požeminėse didelės galios perdavimo sistemose. Iš superlaidininkų pagaminti daugiagysliai kabeliai yra lankstūs, stiprūs ir patvarūs, o transformatoriai – efektyvūs ir kompaktiški. Daugelio superlaidžių medžiagų savitosios funkcinės savybės aptinkamos tik labai plonuose medžiagos sluoksniuose (nuo kelių nanometrų iki kelių mikrometrų storio).

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, jog mišriosios fazės (mišri fazė sukuriama kai išorinio magnetinio lauko stipris viršija superlaidininko kritinį magnetinį lauką H_{c1} arba superlaidininku teka elektros srovė, kurios stipris viršija superlaidininko kritinį elektros srovės stiprį I_c) atsiradimas susijęs su magnetinio srauto prasiskverbimu į superlaidininką Abrikosovo magnetiniais sūkuriais, kurių judėjimas blogina ir didelės, ir mažos galios superlaidžiųjų elektroninių prietaisų charakteristikas. Reiškinių, vykstančių superlaidininko mišrioje fazėje, tyrimas svarbus superlaidžiosios mikroelektronikos prietaisų srityje. Elektroniniuose prietaisuose, kuriuose superlaidžioji medžiaga įgyja mišrią fazę, atsiranda Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimo

sąlygotas elektroninis triukšmas, o pernelyg intensyvus judėjimas gali tapti negrįžtamų pokyčių (t. y. prietaiso „sudegimo“) priežastimi. Tad mišriosios fazės atsiradimo ir Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo superlaidininke tyrimai labai svarbūs mokslui ir praktiniam taikymui, siekiant numatyti atsitiktinį nepageidaujamo reiškinio atsiradimą ir jo vystymąsi. Prognozuojant mišriosios fazės atsiradimą ir jos vystymosi eigą, būtina išmokti kontroliuoti Abrikosovo magnetinių sūkurių atsiradimą ir jų judėjimo superlaidininke pobūdį. Tokią kontrolę realizuoja elektroninės litografijos būdu superlaidžiosios medžiagos sluoksniuose sukurti periodiniai defektai, sluoksnio storio periodinė moduliacija ar prie sluoksnio prispausta magnetinė juostelė su periodiniu magnetiniu įrašu ir kt. Visos minėtos priemonės superlaidininko sluoksnyje sukuria periodiškai išdėstytus sūkurių prieraišos centrus, kurių kuriama prieraišos jėga priešinasi Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui ir kartu mažina atsitiktinio jų judėjimo atsiradimo tikimybę.

Šiame darbe pritaikyta superlaidžių darinių, turinčių kontroliuojamų charakteristikų silpnojo superlaidumo sritis, lazeriu formavimo technologija. Dariniu tekant elektros srovei, galima įvertinti atsirandančių Abrikosovo magnetinių sūkurių tankį ir jų judėjimo pobūdį silpnojo superlaidumo srityse. Tyrimais siekiama paaiškinti Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos jėgos kilmę ir pobūdį. Išmokus valdyti Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimą bei įvertinti tokio judėjimo pobūdį ir judėjimu sąlygotus energijos nuostolius, superlaidžiuosius darinius galima panaudoti kuriant ypatingai jautrius magnetinio lauko bei elektros srovės stiprio matuoklius, kurių jautrio riba – pavienis magnetinio srauto kvantas.

Tyrimų objektas

Antrosios rūšies superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ mišrioji fazė plonuose sluoksniuose, kuriuose lazerio spinduliuote suformuoti superlaidieji dariniai, turintys silpnojo superlaidumo sritis.

Darbo tikslas

Pritaikius silpnojo superlaidumo sričių formavimo plonuosiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniuose technologiją, paaiškinti mišriosios fazės superlaidžiųjų darinių su silpnojo superlaidumo sritimis elektrines ir magnetines savybes, dariniais tekant elektros srovei, kurios stipris $I > I_c$, kai darinių temperatūra $T < T_c$.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

1. MOCVD būdu užaugintuose superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniuose lazeriu suformuoti darinius, turinčius silpnojo superlaidumo sritis, ir ištirti tų sričių dydžio ir formos priklausomybę nuo lazerio spinduliuotės galios;
2. Iš elektrinių ir magnetinių savybių kitimo dėsningumų paaiškinti mišriosios fazės atsiradimo $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiuosiuose dariniuose, su silpnojo superlaidumo sritimis, sąlygas ir vystymosi ypatumus;
3. Ištirti Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo pobūdžio $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniuose, turinčiuose silpnojo superlaidumo sritis, priklausomybę nuo darinio temperatūros ir juo tekančios elektros srovės stiprio.

Tyrimų metodikos

Darbe taikomos $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiųjų darinių su silpnojo superlaidumo sritimis formavimo lazeriu, keturių, trijų bei dviejų įvadų medžiagos elektrinių savybių tyrimų ir skenuojančio tunelinio mikroskopo tyrimų metodikos. Magnetinio srauto prasiskverbimo į superlaidininką kokybiniai tyrimų rezultatai gauti magnetooptinių tyrimų įranga. Cheminių elementų kiekybinė analizė atlikta skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, su jame integruotu Rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopu.

Darbo mokslinis naujumas

Darbe ištirtos superlaidžiųjų darinių, su silpnojo superlaidumo sritimis arba kitaip – sūkurių kanalais, elektrinės ir magnetinės savybės bei gauti šie mokslui nauji ir reikšmingi rezultatai:

1. Pritaikyta $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių, turinčių silpnojo superlaidumo sritis, formavimo lazeriu technologija;

2. Nustatyta, jog Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos jėga priklauso nuo lazerio spinduliuotės galios, naudotos silpnojo superlaidumo srities formavimui ir sąlygojančios deguonies vakansijų kiekio ir tankio pokytį superlaidininke.

3. Nustatyta, jog siaurame temperatūrų intervale $T < T_c$, superlaidžiuoju dariniu tekant srovei $I > I_c$, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai juda koherentiniu judėjimu, kuris atsiranda silpnojo superlaidumo srityje esant ypatingai silpnai sūkurių prieraišos jėgai. Sūkuriams ir antisūkuriams judant koherentiškai, darinių voltamperinėse charakteristikose stebimi elektrinės įtampos „laipteliai“, kuriuos sąlygoja sūkurių ir antisūkurių porų atsiradimas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti tyrimų rezultatai gali būti panaudoti kuriant magnetinio lauko ir/ar elektros srovės stiprio etaloninių matavimų prietaisus, kurių jautris ribojamas magnetinio srauto kvanto $\Phi_o = 2{,}067833758(46)\times10^{-15}$ Wb dydžiu.

Ginamieji teiginiai

1. MOCVD būdu užaugintuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiuose sluoksniuose lazerio spinduliu kambario temperatūroje inertinių dujų aplinkoje galima suformuoti darinius, turinčius silpnojo superlaidumo sritis. Tokių sričių kritiniai superlaidininko parametrai (t. y. I_c, T_c, H_{c1}) priklauso nuo lazerio spinduliuotės galios ir lazerio šviesą sugėrusios superlaidininko medžiagos pradinio deguonies kiekio.
2. Elektros srovei, tekančiai $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniais, stiprėjant, jos kuriamas magnetinis srautas pirmiausiai prasiskverbia į dariniuose esančias silpnojo superlaidumo sritis Abrikosovo magnetiniais sūkuriais, sukuriant mišriąją medžiagos fazę. Esant temperatūrai $T < T_c$, papildomų sūkurio ir antisūkurio porų atsiradimas ir judėjimas sąlygoja energijos nuostolių didėjimą ir lemia darinių netiesinių voltamperinių charakteristikų formą.
3. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių „laiptuotų“ voltamperinių charakteristikų atsiradimą lemia koherentinio Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimas silpnojo superlaidumo sritimi, kurioje, dėl lazerio spinduliu sukurtų papildomų deguonies vakansijų, sūkurių prieraišos jėga ypač maža. Elektros įtampos „laiptelių“ aukštis priklauso nuo sūkurio ir antisūkurio poros kondensacijos energijos, o „laiptelių“ skaičius – nuo silpnojo superlaidumo sritimi judančių sūkurių porų skaičiaus, tačiau, didėjant elektros srovės, tekančios

superlaidininku, stipriui, „laiptelių“ forma silpnai priklauso nuo sūkurių judėjimo greičio.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti penki moksliniai straipsniai: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į ISI Web of Science sąrašą (Jukna et al. 2013, Steponavičienė et al. 2009, 2010, 2011) vienas – mokslo žurnale „Mokslas – Lietuvos ateitis“ (Steponavičienė et al. 2011).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 11 mokslinėse konferencijose:

- 13 – oje, 14 – oje, 15 – oje, 16 – oje jaunųjų mokslininkų konferencijose „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, 2010, 2011, 2012, 2013 m., Vilnius, Lietuva;
- Respublikinėje konferencijoje „Medžiagų inžinerija“, 2010 m., Kaunas, Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje „14th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors“, 2010 m., Vilnius, Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje „15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors“, 2013 m., Vilnius, Lietuva;
- „39 – oje Lietuvos nacionalinėje fizikos konferencijoje“, 2011 m., Vilnius, Lietuva;
- 40 – oje Lietuvos nacionalinėje fizikos konferencijoje“, 2013 m., Vilnius, Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje: „13th International conference-school“, 2011 m., Palanga, Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje: 8th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications. ICPEPA-8, 2012 m., Ročesteris, JAV.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Bendra disertacijos apimtis 85 puslapiai, tekste panaudota 21 numeruotų formulių, 36 paveikslai. Rengiant disertaciją cituojami 85 literatūros šaltiniai.

1

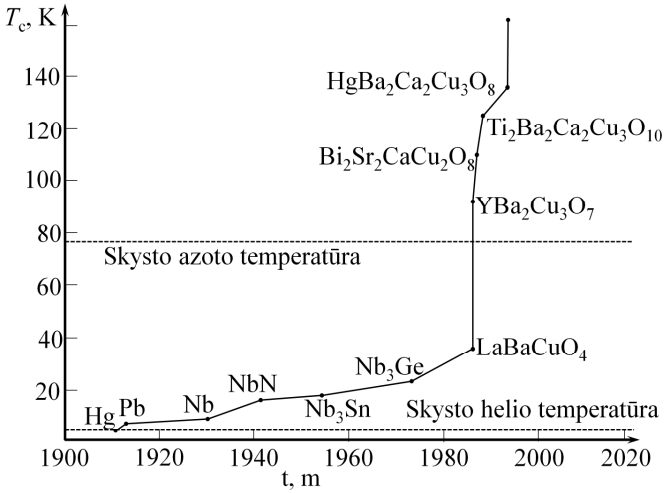
Superlaidumo reiškinys antrosios rūšies superlaidininkuose

Skyriuje aprašomas superlaidumo reiškinys, analizuojama aukštatemperatūrio superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ savybės, fazės, kritiniai parametrai, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai, koherentinis jų judėjimas, prieraišos mechanizmas.

1.1. Superlaidumo atradimas

1911 metais olandų fizikas H. K. Onesas (H. K. Onnes) atrado superlaidumo reiškinį (Onnes 1913). Tyrinėdamas elektrines metalų (gyvsidabrio) savybes helio skystėjimo temperatūroje 4,2 K, H. K. Onesas stebėjo elektrinės varžos išnykimą žemiau kritinės temperatūros. Kritinė temperatūra T_c – tai temperatūra, žemiau kurios medžiagos elektrinė varža lygi nuliui ir elektros srovė teka be pasipriešinimo. Paprasčiausias būdas aptikti superlaidumo reiškinį – matuoti elektrinės įtampos kritimą, įjungus superlaidžią medžiagą į nuolatinės elektros srovės grandinę ir ją šaldant. Jeigu elektrinės įtampos kritimas U tekant elektros srovei I yra lygus 0, tai pagal Omo dėsnį elektrinė varža $R = 0$ (Onnes 1913).

Atradus superlaidumo reiškinį mokslininkai sintetino medžiagas, siekdami, kad jų kritinė temperatūra būtų kuo aukštesnė. Superlaidžiųjų medžiagų, kurių kritinė temperatūra aukštesnė, didesnės praktinio taikymo galimybės. Buvo atrandamos vis naujos superlaidžios medžiagos, tačiau kritinės jų temperatūros ilgai buvo gana žemos. 1986 metais šveicarų mokslininkai J. G. Bednorcas (J. G. Bednorz) ir K. A. Miuleris (K. A. Müller) pradėjo naują superlaidumo erą – aukštatemperatūrį superlaidumą, susintetinę junginį, kurio kritinė temperatūra buvo 35 K (Bednorz *et al.* 1986). 1987 metais M. K. Wu su kolegomis susintetino superlaidųjį $YBa_2Cu_3O_7$ (Wu *et al.* 1987), kurio kritinė temperatūra siekė T_C = 92 K. Labai greitai paaiškėjo, kad itris superlaidžiame $YBa_2Cu_3O_7$ junginyje gali būti sėkmingai pakeistas kitais retaisiais Žemės elementais, tokiais kaip La, Eu, Gd, Dy, Lu, Yb. Šiek tiek vėliau buvo atrasti panašios kristalinės sandaros superlaidūs bismuto junginiai, kurių kritinė temperatūra siekė 110 K. Pabandžius pakeisti bismutą, buvo atrastos dvi superlaidžiųjų talio junginių grupės, kurių kritinė temperatūra siekė 125 K. 1994 metais pasirodė pranešimai apie dar dvi šeimas gyvsidabrio superlaidžių junginių, kurių kritinė temperatūra siekė net 135 K. Taip pat buvo pastebėta, kad slegiant šiuos junginius kritinė temperatūra padidėja net iki 164 K. 1.1 paveiksle vaizduojama, kaip kito kritinės temperatūros dydis atrandant, susintetinant vis naujus superlaidžius junginius.



1.1. pav. Superlaidžių medžiagų kritinės temperatūros kitimas susintetinant vis naujus junginius (Alexandrov *et al.* 2000)

Fig. 1.1. The critical temperature change in superconductive materials due to the synthesis of new components (Alexandrov *et al.* 2000)

Pastaraisiais metais ir toliau bandoma susintetinti naujus aukštatemperatūrius superlaidžius junginius, kurių kritinė temperatūra būtų artima arba lygi kambario temperatūrai.

1.2. Aukštatemperatūrių superlaidininkų savybės

Aukštatemperatūriai superlaidininkai (toliau ATS) turi sluoksniuotą kristalinę perovskitinę struktūrą, kurią sudaro periodiškai erdvėje pasikartojančios plokštumos (Alcacer 1989). Perovskitinė struktūra lemia medžiagos mechanines, šilumines, elektrines, optines savybes, taip pat ir superlaidžiųjų savybių anizotropiją (Basov *et al.* 1995, Zelezny *et al.* 1995).

Įprastame laidininke elektros srovė yra elektronų srautas, judantis per kristalinę gardelę. Elektronai nuolatos susiduria su jonais ir atiduoda savo kinetinę energiją, kuri virsta kristalinės gardelės virpesiais – vidine energija. Superlaidumo mikroskopinę teoriją 1957 metais sukūrė J. Bardenas (J. Bardeen), L. Kuperis (L. Cooper) ir R. Šriferis (R. Schrieffer), pristatę kaip Bardeno-Kuperio-Šriferio (Bardeen-Cooper-Schrieffer) (BKŠ) teoriją. Pagal šią teoriją, svarbiausia superlaidumą sukelianti priežastis yra elektronų ir kristalinės gardelės sąveika (Bardeen *et al.* 1957). Dėl šios sąveikos laisvieji elektronai deformuoja kristalinę gardelę. Elektronas ir jį supantys jonai sudaro teigiamai įelektrintą visumą, pritraukiančią antrąjį elektroną. Taip susidaro elektronų poros, vadinamos Kuperio poromis (Cooper 1956). Atstumas tarp elektronų, kurie sudaro Kuperio poras, vadinamas superlaidininko koherentiškumo ilgiu, kuris yra apie 10^{-6} m (Cooper 1956). Koherentiškumo ilgis $\xi(T)$ superlaidininke priklauso nuo temperatūros (Buzea *et al.* 2001, Albrecht 2003):

$$\xi(T) = \frac{\xi_{ab}(0)}{\sqrt{1 - T/T_c}}, \tag{1.1}$$

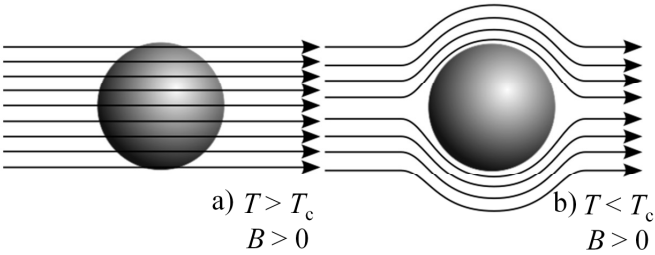
čia $\xi_{ab}(0)$ – koherentiškumo ilgis (Kuperio poros ilgis) ab plokštumoje, kai $T \to 0$ K. Disertacijoje tiriamo superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (toliau YBCO), koherentiškumo ilgis $\xi_{ab}(0) \approx 1{,}6$ nm (Nguyen *et al.* 1993, Modanesse 2003).

Kuperio poras sudaro elektronai, kurių sukiniai yra priešingų krypčių. Todėl Kuperio poros sukinys lygus nuliui. Suporuoti krūvininkai elgiasi kaip bozonai, t. y. tą patį elektronų energijos lygmenį užima bet koks Kuperio porų skaičius (Cooper 1956). Elektronams jungiantis į Kuperio poras, elektroninės posistemės energija kristale sumažėja. Tarp elektronų energijos užpildytųjų ir laisvų energijos lygmenų atsiranda draudžiamų energijų juosta. Jos plotis 2Δ priklauso nuo kritinės temperatūros T_c (Cooper 1956). Žemų temperatūrų srityje kristalinės

gardelės šiluminių virpesių energijos nepakanka Kuperio poroms suardyti, todėl elektronų sklaida nevyksta, o nuostovioji elektros srovė kristalu teka be pasipriešinimo (Bednorz *et al.* 1986). Medžiaga pereina į superlaidžią fazę ir stebimas Meisnerio reiškinys (1.2 pav.) (Meissner *et al.* 1933).

I rūšies superlaidininkui esant aukštesnėje nei kritinė temperatūra $T > T_c$ ir magnetinio lauko stipris mažesnis už kritinį magnetinį lauką $H < H_c$, elektros srovės, tekančios medžiaga, kuriamas ar išorinis magnetinis laukas skverbiasi į medžiagą visame jos tūryje. Kai superlaidininko temperatūra žemesnė nei kritinė $T < T_c$, magnetinis laukas yra išstumiamas iš medžiagos tūrio į jos paviršių. H_c – kritinis magnetinis laukas, žemiau kurio medžiaga yra superlaidžioje fazėje.

II rūšies superlaidininke elektros srovės, tekančios medžiaga, kuriamo ar išorinio magnetinio lauko įsiskverbimas į medžiagą priklauso nuo jo dydžio. H_{c1} – pirmasis kritinis magnetinis laukas, kuriam esant medžiaga yra superlaidžioje fazėje – magnetinis laukas įsiskverbia į superlaidininką tik jo paviršiuje. H_{c2} – antrasis kritinis magnetinis laukas, kuriam esant medžiaga virsta į normaliąją fazę – magnetinis laukas skverbiasi visame superlaidininko tūryje.



1.2. pav. Meisnerio reiškinio iliustracija. a) – superlaidininko temperatūra $T > T_c$, magnetinio lauko indukcija $B > 0$; b) – superlaidininko temperatūra $T < T_c$, magnetinio lauko indukcija $B > 0$

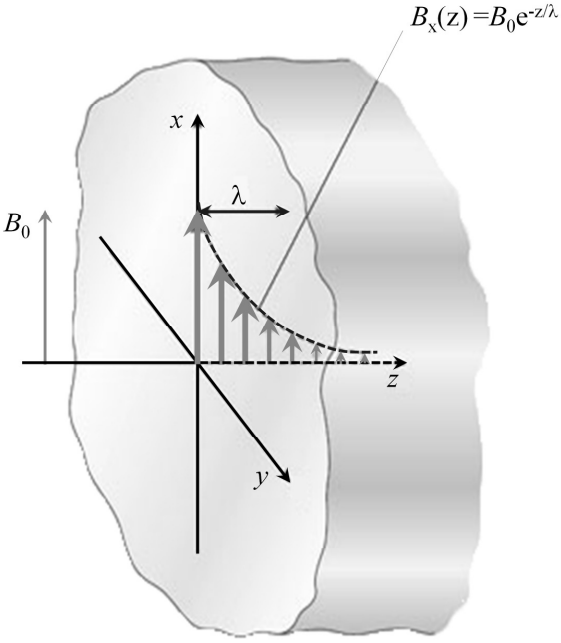
Fig. 1.2. The present illustration depicts the phenomenon known as the Meissner Effect. a) – the temperature of superconductor $T > T_c$, induction of magnetic field $B > 0$; b) – the temperature of superconductor $T < T_c$, induction of magnetic field $B > 0$

F. ir H. Londonai (F. London. H. London) nustatė, kad magnetinio lauko indukcija B eksponentiškai mažėja $B_x(z) = B_0 \exp(-z/\lambda)$ (1.3 pav.) skverbiantis gilyn į superlaidininką.

Magnetinio lauko indukcijos $B_x(z)$ dydis priklauso nuo išorinio ar elektros srovės kuriamo magnetinio lauko indukcijos B_0 ir magnetinio lauko prasiskverbimo gylio λ – atstumo, kuriuo magnetinis laukas įsiskverbia į medžiagą. Kaip ir kitos superlaidininko charakteristikos, t. y. magnetinis laukas, koherentiškumo ilgis, elektrinė varža, savitoji elektrinė varža, taip ir magnetinio lauko prasiskverbimo gylis $\lambda(T)$ priklauso nuo temperatūros:

$$\lambda(T) = \frac{\lambda_{ab}(0)}{\sqrt{1 - T/T_c}}, \tag{1.2}$$

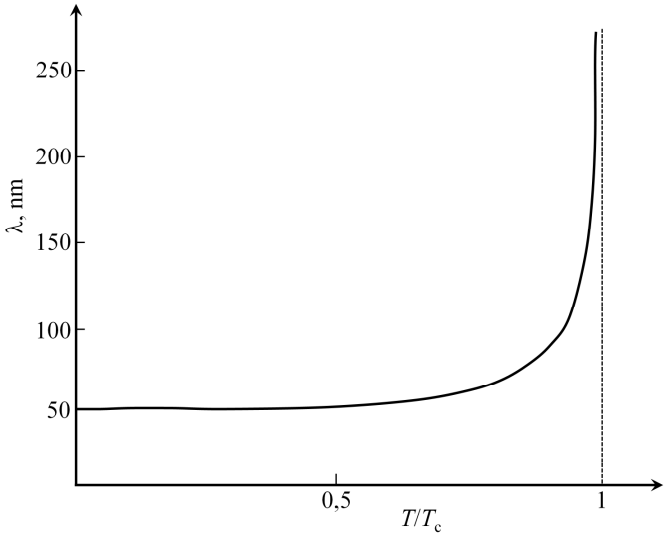
čia $\lambda_{ab}(0)$ – magnetinio lauko prasiskverbimo gylis a ar b plokštumoje $T \to 0$ K. Magnetinio lauko prasiskverbimo gylis daugumai superlaidininkų yra apie 100 nm (Nguyen *et. al.* 1993). YBCO magnetinio lauko prasiskverbimo gylis $\lambda_{ab}(0) = 130$ nm (Basov *et.al.* 1995).



1.3. pav. Iliustracijoje pavaizduotas magnetinio lauko indukcijos eksponentinis mažėjimas skverbiantis gilyn į superlaidininko tūrį. $B_x(z)$ – magnetinio lauko, įsiskverbusio į superlaidininką, indukcija, B_0 – išorinio magnetinio lauko indukcija, *x, y, z* – koordinatės, λ – magnetinio lauko prasiskverbimo gylis (Nguyen *et. al.* 1993)
Fig. 1.3. Ilustration shows exponential decline in the magnetic field induction providing it is pushed deeper into the superconductor volume. B_x (*z*) – the induction of the magnetic field pushed into the superconductor, B_0 – the external magnetic field induction, *x, y, z* – the coordinates, and λ – the depth of penetration into the magnetic field (Nguyen *et. al.* 1993)

Mažėjant superlaidininko temperatūrai, mažėja magnetinio lauko prasiskverbimo į superlaidininką gylis λ. Kai $T \sim T_c$, magnetinio lauko prasiskverbimo gylis mažėja labai greitai. Toliau mažėjant temperatūrai, magnetinio lauko prasiskverbimo gylis mažėja lėčiau (1.4 pav.), kol pasiekia

tam tikrą, kiekvienam superlaidininkui būdingą magnetinio lauko prasiskverbimo gylį λ (Albrecht 2003).



1.4. pav. Magnetinio lauko prasiskverbimo į superlaidininką gylio λ priklausomybė nuo temperatūros T. T_c – kritinė superlaidininko temperatūra (Harshman *et al.* 2004)

Fig. 1.4. The magnetic field penetration depth λ dependence on the temperature T. T_c – the critical temperature of superconductor (Harshman *et al.* 2004)

Kritinis magnetinis laukas H_c ir kritinė temperatūra T_c – kritiniai superlaidžios medžiagos parametrai, kurie apibrėžia, kokioje fazėje yra superlaidininkas. I rūšies superlaidininkai turi dvi fazes: normalią, kai $T > T_c$ ir $H > H_c$, ir superlaidžią, kai $T \leq T_c$ ir $H \leq H_c$ (Buzea *et al.* 2001). Kritinis magnetinis laukas H_c priklauso nuo temperatūros T, magnetinio srauto kvanto Φ_0:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15}\ \text{Wb (Abrikosov 1957)}, \tag{1.3}$$

(h – Planko konstanta, e – elektrono krūvis), magnetinio lauko prasiskverbimo gylio λ ir koherentiškumo ilgio ξ:

$$H_c(T) = \frac{\Phi_0}{2\sqrt{2}\pi\lambda(T)\xi(T)}\ . \tag{1.4}$$

II rūšies superlaidininkai turi tris fazes: normalią, kai $T > T_c$ ir $H > H_{c2}$, superlaidžią, kai $T \leq T_c$ ir $H < H_{c1}$, ir mišrią, kai $T \leq T_c$ ir $H_{c1} < H < H_{c2}$ (Buzea *et al.* 2001):

$$H_{c1}(T) = \frac{\Phi_0}{4\pi\lambda^2(T)} ln\kappa , \tag{1.5}$$

$$H_{c2}(T) = \frac{\Phi_0}{4\pi\xi^2(T)} , \tag{1.6}$$

čia κ – Ginzburgo – Landau (V. L. Ginzburg, L. Landau) parametras, kuris apsprendžia kokios rūšies superlaidininkas:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} . \tag{1.7}$$

I rūšies superlaidininkams $0 < \kappa < 1/\sqrt{2}$, t. y. $\lambda < \xi$, o II rūšies superlaidininkams $\kappa > 1/\sqrt{2}$, t. y. $\lambda > \xi$.

1957 metais A. A. Abrikosovas (A. A. Abrikosov) aprašė, kad mišrioje fazėje elektros srovės, tekančios medžiaga, kuriamas ar išorinis magnetinis laukas į superlaidininką skverbiasi Abrikosovo magnetiniais sūkuriais ir antisūkuriais, kurių kiekvienas yra magnetinio srauto kvantas Φ_0.

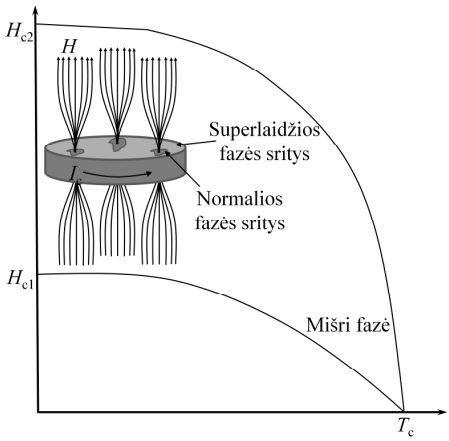
1.3. Aukštatemperatūrių superlaidininkų mišri fazė ir Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai

II rūšies superlaidininke, kai temperatūra $T \leq T_c$ ir elektros srovės, tekančios medžiaga, kuriamo ar išorinio magnetinio lauko stipris yra intervale $H_{c1} < H < H_{c2}$, koegzistuoja superlaidžios ir normalios fazės sritys.

Mišrios fazės egzistavimas aiškinamas tuo, kad medžiaga visada įgyja mažiausios laisvosios energijos būseną (Troyanovski *et al.* 1999). Kai magnetinio lauko prasiskverbimo gylis $\lambda(T)$ didesnis už koherentiškumo ilgį $\xi(T)$, medžiagos paviršiaus energija neigiama, atsiranda normalios fazės sritys, sumažinančios bendrą laisvą paviršiaus energiją ir sukeliančios palankesnes sąlygas magnetiniam srautui prasiskverbti į superlaidininko tūrį (Kuriki *et al.* 2000). Magnetinis srautas prasiskverbia į superaidininką Abrikosovo magnetiniais sūkuriais, kurių kiekvienas yra magnetinio srauto kvantas (1.5 pav.).

Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai skverbiasi į medžiagą silpnojo superlaidumo vietose, t. y. superlaidaus sluoksnio srityse, kuriose mažesnė T_c, silpnesnė I_c ir silpnesnis H_{c1}.

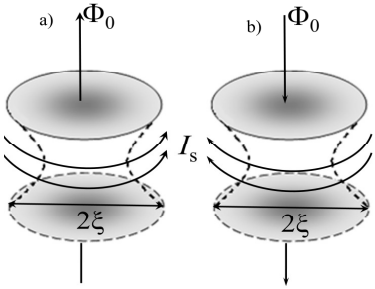
Normaliose srityse nėra superlaidžių Kuperio porų, o tolstant nuo magnetinio sūkurio ir antisūkurio šerdies, kol atstumas tampa lygus superlaidininko koherentiškumo ilgiui ξ, Kuperio porų tankis didėja (Kuriki *et al.* 2000).



1.5. pav. Magnetinio lauko priklausomybės nuo temperatūros iliustracija. H_{c1}, H_{c2} – kritiniai magnetiniai laukai

Fig. 1.5. The illustration of magnetic field dependence on temperature. H_{c1}, H_{c2} – the first and the second critical magnetic fields

Abrikosovo magnetinis sūkurys ir antisūkurys sudarytas iš normalios srities šerdies, apie kurią teka superlaidi elektros srovė I_S.

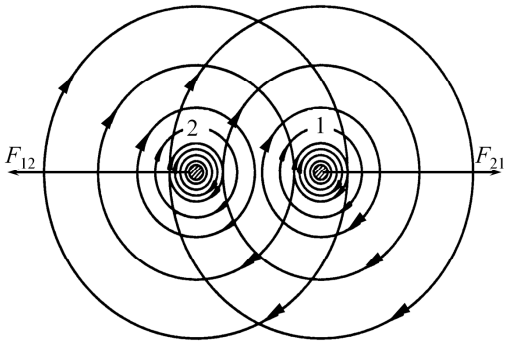


1.6. pav. Abrikosovo magnetinio sūkurio (a) ir antisūkurio (b) iliustracija. ξ – koherentiškumo ilgis. I_S – superlaidi elektros srovė. Φ_0 – magnetinio lauko kvantas

Fig. 1.6. An illustration of Abrikosov magnetic vortex(a)/antivortex(b). ξ – the coherence length,. I_S – superconductive electrical current. Φ_0 – flux of magnetic field

Superlaidi elektros srovė I_S teka magnetinio sūkurio ir antisūkurio šerdies pakraščiuose, magnetinio lauko parsiskverbimo gylyje λ. Abrikosovo magnetinis sūkurys (a) ir antisūkurys (b), kurio skersmuo 2 koherentiškumo ilgiai, tai priešingos krypties magnetiniai srautai, įsiskverbę į superlaidininką (1.6 pav.).

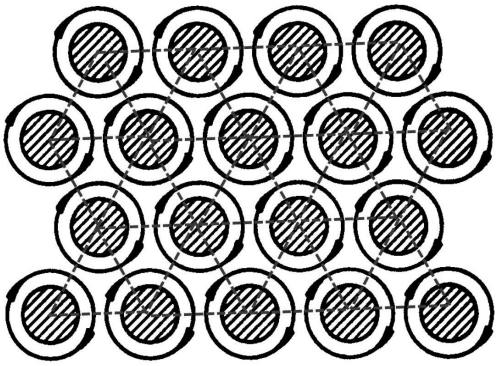
Įsiskverbę į medžiagą Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai veikia vienas kitą elektromagnetine sąveika, t. y. sūkurys stumia sūkurį, antisūkurys stumia antisūkurį, sūkurys traukia antisūkurį.



1.7. pav. Abrikosovo magnetinių sūkurių 1 ir 2 elektromagnetinės sąveikos iliustracija. F_{12}, F_{21} – jėgos, kuriomis 1 magnetinis sūkurys stumia 2 ir atvirkščiai

Fig. 1.7. An illustration of electromagnetic interaction of Abrikosov magnetic vortices 1 and 2. F_{12}, F_{21} – the force that enables the first magnetic vortex to push the second vortex, and vice versa

Dėl elektromagnetinės sąveikos Abrikosovo magnetiniai sūkuriai išsidėsto į magnetinę gardelę (Abrikosovo gardelė) (Abrikosov 1957, Tinkham 1975, Lykov 1992).



1.8. pav. Abrikosovo magnetinių sūkurių magnetinės gardelės iliustracija

Fig. 1.8. An illustration of the magnetic lattice of Abrikosov magnetic vortices

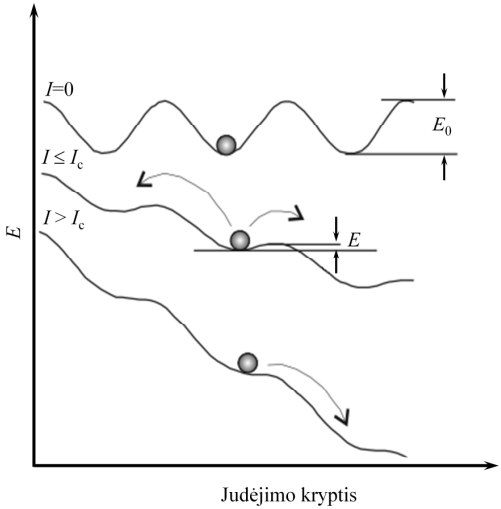
Magnetinės gardelės dydis priklauso nuo Abrikosovo magnetinių sūkurių skersmens $2\xi(T)$ ir atstumo d tarp jų. Atstumas d tarp Abrikosovo magnetinių sūkurių priklauso nuo medžiaga tekančios elektros srovės, kuriamo arba išorinio magnetinio lauko indukcijos B. Jei elektromagnetinė sąveika tarp Abrikosovo magnetinių sūkurių stipresnė už sąveiką tarp atskiro sūkurio su prieraišos centru, tai atstumas tarp sūkurių gali būti suskaičiuotas iš sąryšio (Fetter *et al.* 1966):

$$d = \left(\frac{\sqrt{3}\Phi_0}{2B} \right)^{1/2}, \tag{1.8}$$

čia d – atstumas tarp magnetinių sūkurių magnetinėje gardelėje, B – medžiaga tekančios elektros srovės, kuriamo arba išorinio magnetinio lauko indukcija, Φ_0 – magnetinio srauto kvantas.

Stiprėjant magnetiniam laukui Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičius didėja, o atstumai tarp magnetinių sūkurių magnetinėje gardelėje mažėja. Abrikosovo magnetiniai sūkuriai įsiskverbę į medžiagą galėtų laisvai judėti medžiagoje, kurioje nėra prieraišos centrų – defektų. Tačiau superlaidžiose medžiagose yra taškinių ar išplėstinių medžiagos defektų, tokių kaip superlaidžiojo darinio kristalitų sąaugų ribos, sraigtinės (Durrell *et al.* 2009) ar krašto (Hawley *et al.* 1991) dislokacijos, ertmės, deguonies vakansijos (Mikitik *et al.* 2009), aukštatemperatūriuose superlaidininkuose priemaišos, sluoksnio storio netolygumai (Wördenweber 1999) ir kt. Defektai atsiranda augimo metu arba sukuriami dirbtinai (Wördenweber 1999). Įsiskverbę į superlaidininką Abrikosovo magnetiniai sūkuriai „prikimba“ prie įvairių kristalinės struktūros ar cheminės sudėties defektų (t. y. prieraišos centrų) (Bhattacharya 1993), nes defektinėje superlaidininko srityje kritiniai medžiagos parametrai (t. y. H_{c1}, T_c, I_c) mažesni nei srityje be defektų. Abrikosovo magnetiniams sūkuriams ir antisūkuriams įsiskverbti į medžiagą reikia energijos, kurios jiems suteikia elektros srovė tekanti medžiaga. Ši energija – tai kondensacijos energija E, kuri yra skirtumas tarp normalios ir superlaidžios sričių energijų. Energijos Abrikosovo magnetiniams sūkuriams reikia tam, kad superlaidžią sritį paversti normalia ir įsiskverbti į ją. Jei Abrikosovo magnetinis sūkurys ir antisūkurys skverbiasi srityje, kurioje yra defektas, jam reikia mažesnės kondensacijos energijos, nei srityje, kurioje nėra defekto. Taip pat kuo didesni defektų matmenys, su kuriais sąveikauja įsiskverbę Abrikosovo magnetiniai sūkuriai, tuo mažesnės kondensacijos energijos jiems reikia, kad įsikverbtų į medžiagą. Kondensacijos energija ir elektros srovės, tekančios superlaidininku, stiprio dydis lemia, kaip juda Abrikosovo magnetiniai sūkuriai, įsiskverbę į medžiagą (Lykov *et al.* 1992). 1.9 paveikle pavaizduota Abrikosovo magnetinių sūkurių mišrioje fazėje judėjimo galimybės.

Kai elektros srovės stipris artimas nuliui $I = 0$, įsiskverbę Abrikosovo magnetiniai sūkuriai į medžiagą turi didžiausią kondensacijos energiją E_0 ir stipriai sąveikauja su medžiaga ir tarpusavyje. Šios sąveikos rezultatas – magnetinių sūkurių magnetinė gardelė, stipriai prikibusi prie prieraišos centrų. Tokioje magnetinėje gardelėje pasireiškia tolimoji tvarka (Bragg glass) (Koblischaka *et al.* 2000).



1.9. pav. Abrikosovo magnetinio sūkurio judėjimo galimybių iliustracija. E_0, E – kondensacijos energija, I – bandiniu tekanti elektros srovė, I_c – kritinė superlaidininko elektros srovė (Koblischaka *et al.* 2000)

Fig. 1.9. An illustration of Abrikosov magnetic vortices moving possibilities. E_0, E – the condensation energy, I – the electric current flowing through the sample, and I_c – the critical electric current in the superconductive material (Koblischaka *et al.* 2000)

Kiekvienas prieraišos centras veikia Abrikosovo magnetinius sūkurius prieraišos jėga f_p, kuri trukdo jiems judėti be energijos nuostolių medžiagoje. Tuomet Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišą superlaidininke lemia prieraišos centrų kuriamas prieraišos jėgos tankis F_P (Wördenweber 1999):

$$F_P = \Sigma\left(\frac{f_P}{V}\right), \tag{1.9}$$

čia V – superlaidininko tūris. Kai elektros srovės stipris artimas kritiniam $I \leq I_c$ (1.9 pav.), pasireiškia konkurencija tarp prieraišos prie defektų ir Abrikosovo magnetinių sūkurių tarpusavio sąveikos, kuri griauna tolimąją magnetinių sūkurių magnetinės gardelės tvarką (Kuriki *et al.* 2000). Tarp magnetinių sūkurių įsivyrauja artimoji tvarka, t. y. elektromagnetinė sąveika siekia nedideliu

atstumu (Klaassen *et al.* 2001). Magnetinių sūkurių magnetinė gardelė, veikiama elektros srovės, kuriamos Lorenco jėgos F_L įveikia prieraišos jėgą F_P, atitrūksta nuo prieraišos centrų ir juda iki kitų prieraišos centrų, kur vėl sustoja (flux creep). Kai elektros srovės stipris didesnis už kritinį elektros srovės stiprį $I > I_c$ (1.9 pav.), elektros srovės, kuriama Lorenco jėga F_L Abrikosovo magnetinius sūkurius veikia taip stipriai, kad prieraišos centrai nebesugeba jų pagauti ir jie juda nesustodami (fux flow) (Ohshima *et al.* 2003).

Plonuosiuose superlaidininkų sluoksniuose Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos savybes lemia konkurencija tarp atsitiktinai ir tvarkingai išsidėsčiusių prieraišos centrų, todėl superlaidininkuose gali susidaryti įvairios Abrikosovo magnetinių sūkurių gardelių konfigūracijos (Horng *et al.* 2004). Siekiant kontroliuoti Abrikosovo magnetinių sūkurių atsiradimą ir jų judėjimą kuriami periodiniai prieraišos mechanizmai: elektroninės litografijos būdu superlaidžiosios medžiagos sluoksniuose sukurti periodiniai defektai (Lin *et al.* 1996), sluoksnio storio periodinė moduliacija ar prie sluoksnio prispausta magnetinė juostelė su periodiniu magnetiniu įrašu (Yuzhelevski *et al.* 1999) ir kt. Minėtos priemonės superlaidininko sluoksnyje sukuria periodiškai išdėstytus sūkurių prieraišos centrus (Horng *et al.* 2004), kurių kuriama prieraišos jėga priešinasi sūkurių judėjimui ir mažina atsitiktinio jų judėjimo atsiradimo tikimybę.

1.4. Sąlygos Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentiniam judėjimui atsirasti

Nuo prieraišos ir Lorenco jėgų stiprio priklauso Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas superlaidininke. Lorenco jėgos F_L stipris priklauso nuo elektros srovės, tekančios superlaidininku, tankio – J, Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičiaus – N, magnetinio srauto kvanto – Φ_0 (Kalisky *et al.* 2009, Marriso *et al.* 1970, Wimbush *et al.* 2009):

$$F_L = JN\Phi_0 . \tag{1.10}$$

Kai superlaidininku teka silpna elektros srovė $I < I_c$, defektų kuriama prieraišos jėga didesnė už elektros srovės kuriamą Lorenco jėgą $f_P \geq F_L$ (Yuzhelevski *et al.* 1999) ir Abrikosovo magnetiniai sūkuriai nejuda arba juda pavieniai, netvarkingai. Stiprėjant elektros srovei, tekančiai superlaidininku, stiprėja Lorenco jėga, o prieraišos jėga nesikeičia. Kai elektros srovės stipris artimas kritiniam $I \geq I_c$, Lorenco jėga tampa lygi arba viršija prieraišos jėgą $F_L \geq f_P$, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai juda koherentiškai, t. y. jie visi kartu juda sudarydami tolimosios tvarkos magnetinę gardelę ir tarp jų yra stipri

elektromagnetinė sąveika (Blamire 1987, Lykov 1992, Reichhardt *et al.* 1997, Yuzhelevski *et al.* 1999). Lorenco jėga, nukreipta statmenai bandiniu tekančios elektros srovės krypčiai, stumia Abrikosovo magnetinius sūkurius nuo superlaidžiojo sluoksnio kraštų link centro. Susitikę Abrikosovo magnetiniai sūkuriai su antisūkuriais anihiliuoja (Anderson *et al.* 1964, Chaparala *et al.* 1996, Jung *et al.* 2000; Kuriki *et al.* 2000). Kad Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius išliktų nekintamas, užgimsta kita Abrikosovo magnetinio sūkurio ir antisūkurio pora. Koherentinis judėjimas galimas tuomet, kai Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių užgimimo laikas lygus jų lėkio iki anihiliacijos linijos ir anihiliacijos laikų sumai Idealiu atveju II rūšies aukštatemperatūriuose superlaidininkuose energijos sklaida vyktų bet kokiomis sąlygomis versdama juos judėti visus kartu. Tačiau realiame II rūšies superlaidininke prieraišos jėga f_P trukdo Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui ((Bishop *et al.* 1993, Mühlbauer *et al.* 2009).

Periodinė prieraiša sukuria sąlygas Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentiniam judėjimui. Autoriai (Blamire 1987, Lykov 1992, Yuzhelevski *et al.* 1999) pristato įvairius periodinės prieraišos pavyzdžius: sluoksnio storio moduliacija, nelygūs sluoksniai, periodinis skylių ir magnetinių taškų, intarpų, defektų išdėstymas. Toliau aprašomi kelių autorių darbai, kurie eksperimentinius rezultatus (varžos priklausomybė nuo temperatūros, voltamperinės charakteristikos) aiškina Abrikososvo magnetinių sūkurių judėjimu. Koherentinis judėjimas eksperimentuose fiksuojamas kaip elektrinės įtampos laipteliai voltamperinėse charakteristikose. Taip pat elektrinei varžai pasiekus kritinę temperatūrą stebimas aukštatemperatūrinis fazinis virsmas. Tačiau elektrinė varža netampa lygi nuliui, o stebimas antrasis, žematemperatūrinis fazinis virsmas (Martın *et al.* 1997, Blamire 1987, Lykov 1992).

Yuzhelevski *et al.* 1999 Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentiniam judėjimui stebėti naudoja prie superlaidaus sluoksnio prispaustą magnetinę juostelę su periodiniu magnetiniu įrašu. Išmatuotose voltamperinėse charakteristikose stebimi elektros srovės laipteliai.

Pedyash *et al.* 1995 tiria submikronines mikrostruktūras, suformuotas naudojant elektroninę litografiją. Išmatuotos voltamperinės charakteristikos yra netiesinės, turinčios elektrinės įtampos laiptelius. Šiose submikroninėse mikrostruktūrose stebimi kritinės elektros srovės svyravimai priklausomai nuo sluoksnių storio. Autoriai tai sieja su Abrikosovo magnetinių sūkurių kraštinių dislokacijų prieraiša.

Elektroninę litografiją dariniams suformuoti naudoja Larsson *et al.* 2000. Šių autorių suformuotuose nanodariniuose 70–170 nm pločio elektrinės varžos priklausomybėje nuo temperatūros stebimas 3–4 K pločio fazinis virsmas žemesnėje temperatūroje nei kritinė ir voltamperinėse charakteristikose stebimi elektrinės įtampos laipteliai.

Martı´n *et al.* 1997, naudodamas elektroninę litografiją, suformavo periodinius submikroninius magnetinius taškus. Autoriai superlaidžių sluoksnių elektrinės varžos fazinį virsmą žemesnėje temperatūroje aiškina Abrikosovo magnetinių sūkurių sąveika su šiais defektais.

Eksperimentinius rezultatus (voltamperinių charakteristikų elektrinės įtampos laiptelius, elektrinės varžos priklausomybių nuo temperatūros kitimus) autoriai grindžia Abrikosovo magnetinių sūkurių įsiskverbimu į superlaidininką mišrioje fazėje ir koherentinį jų judėjimą. Nawaz *et al.* 2011 Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentinį judėjimą stebi nanostruktūrose, kurios gali būti panaudojamos nanoskviduose arba pavienių fotonų detekcijai.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Apžvelgus superlaidumo reiškinį, superlaidžias medžiagas, jų kritinius parametrus, fazes, Abrikosovo magnetiniai sūkurius ir antisūkurius suformuluotos išvados:

1. Aukštatemperatūris superlaidininkas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yra medžiaga, kuri turi augimo metu susiformavusius defektus. Taip pat įvairiais būdais galima sukurti papildomus, periodinius defektus. Tai leidžia sukurti silpnojo superlaidumo sritis su mažesniais kritiniais superlaidininko parametrais.
2. Išorinis ar elektros srovės tekančios bandiniu kuriamas magnetinis laukas kurio stipris $H > H_{c1,}$ į silpnojo superlaidumo sritį skverbiasi Abrikosovo magnetiniais sūkuriais.
3. Įvairiais metodais suformuotose superlaidžiose struktūrose Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentinis judėjimas priklauso nuo prieraišos mechanizmo, elektros srovės stiprio, tekančio superlaidininku, ir bandinio temperatūros.

Disertacijos uždaviniai:

1. MOCVD būdu užaugintuose superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniuose lazeriu suformuoti darinius, turinčius silpnojo superlaidumo sritis.
2. Iš elektrinių ir magnetinių savybių kitimo dėsningumų paaiškinti mišriosios fazės atsiradimo $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiuosiuose

dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis sąlygas ir vystymosi ypatumus.

3. Ištirti Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo pobūdžio $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniuose, turinčiuose silpnojo superlaidumo sritis, priklausomybę nuo darinio temperatūros ir juo tekančios elektros srovės stiprio.

2

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiųjų plonųjų sluoksnių auginimo ir tyrimo būdai

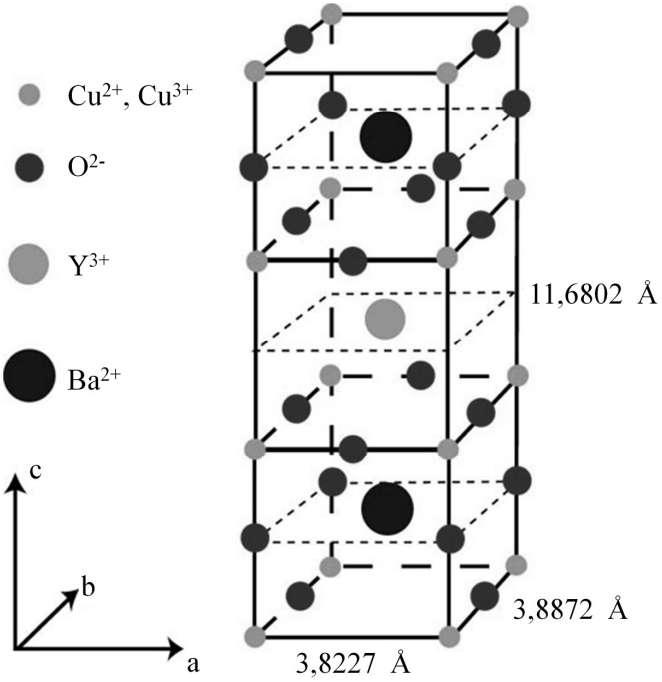
Plonieji atskirų cheminių elementų bei jų junginių sluoksniai, taip pat daugiasluoksniai jų dariniai yra plačiai naudojami gaminant daugelį mikroelektronikos ir optoelektronikos prietaisų, pavyzdžiui, įvairius jutiklius, rezistorius, kondensatorius, integrines grandines, optinius filtrus ir t.t. Auginant tokiems prietaisams reikalingus sluoksnius yra labai svarbu, kad kiekvienas sluoksnis augtų ištisinis, o jo paviršius būtų kuo lygesnis. Kokybiškiems sluoksniams auginti reikalingos specialios sąlygos, t. y. reikia ne tik pasirinkti tinkamiausius auginimo būdus, nustatyti tinkamiausias auginimo sąlygas, bet ir parinkti tokius padėklus, kurių gardelių parametrai būtų artimesni auginamo sluoksnio gardelių parametrams, nes dėl nesutapimo epitaksinių sluoksnių savybės gali nežymiai ar net iš esmės keistis. Ploni cheminių elementų ir cheminių junginių sluoksniai gali būti auginami medžiagai besikristalizuojant iš skystos (persotinto skysčio) arba besikondensuojant iš dujinės fazės. Daugelis metalų oksidų pasižymi gana aukštomis lydymosi temperatūromis ir todėl ploniesiems jų sluoksniams auginti dažniausiai pasirenkami įvairūs kondensacijos iš garų fazės būdai: magnetroninis dulkinimas, impulsinis lazerinis, cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės.

Disertacijoje tyrinėjamo daugiakomponenčio metalų oksido YBCO plonųjų sluoksnių auginimui buvo pasirinktas cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės metodas – geriausiai šiam tikslui tinkantis plonųjų sluoksnių auginimo metodas.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Jukna *et al*. 2013, Steponavičienė *et al*. 2009, 2010, 2011, 2011).

2.1. Aukštatemperatūrio superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ savybės

2.1 paveiksle pateikta superlaidininkas YBCO elementari kristalinė gardelė.



2.1. pav. Superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ perovskitinė gardelės struktūra. Skirtingos spalvos apskritimais pažymėti elementai, sudarantys kristalinę gardelę. Gardelės parametrai a = 3,8227 Å, b = 3,8872 Å, c = 11,682 Å (Jorgensen *et al.* 1990; Lebedev *et al.* 2001)

Fig. 2.1. The perovskite lattice structure in the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Colored circles mark different elements forming a crystalline lattice. The array has the following parameters: a = 3,8227 Å, b = 3,8872 Å, c = 11,682 Å (Jorgensen *et al.* 1990; Lebedev *et al.* 2001)

YBCO kristalinė gardelė sudaryta iš Cu-O ir Cu-O_2 plokštumų, kurios susijusios su aukštatemperatūriu superlaidumu, ir Y-O bei Ba-O tarpsluoksnių (Lebedev *et al.* 2001). Šis superlaidininkas turi daug privalumų lyginant su kitomis ATS medžiagomis. Tai stabili medžiaga, sudaryta iš keturių komponentų, neturinti toksinių bei lakiųjų elementų, mažiau anizotropinė nei kitos superlaidžios medžiagos (Wu *et al.* 1987).

2.2. Injekcinis impulsinis cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės metodas

Auginant plonuosius sluoksnius cheminio medžiagų nusodinimo iš metalo organinių garų fazės metodu (toliau MOCVD (Metal – Organic Chemical Vapour Deposition) elementų – superlaidžių sluoksnių komponentų – dujiniai junginiai arba junginių garai iš jų šaltinių transportuojami (šildomais takais) dujų srautu į kolektorių, kur jie sumaišomi, po to mišinys nešamas į reaktorių prie įkaitusio iki 8500 ^{o}C temperatūros padėklo, ant kurio paviršiaus garai skyla ir auga oksido plėvelė (Abrutis *et al.* 1997).

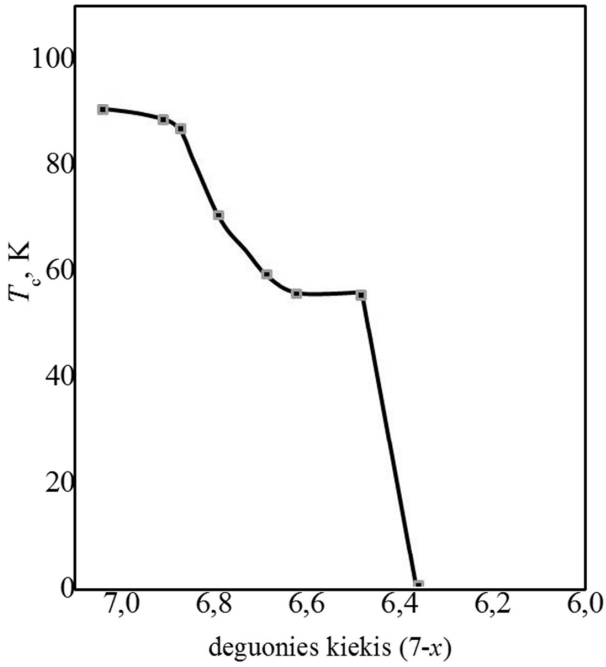
Auginant aukštatemperatūrių superlaidininkų YBCO sluoksnius pradiniais junginiais dažniausiai naudojami kieti metalų (Y, Ba, Cu) organiniai junginiai (MO junginiai), kurie garinami kaitinant, o garai transportuojami į reaktorių prie karšto padėklo. MOCVD metodu ant padėklo suformuojamos sudėtingos aukštatemperatūrės superlaidžios struktūros, išgaunama vieninga kristalitų orientacija (epitaksija), nuo kurios priklauso didelis kritinis elektros srovės tankis. Šiuo metodu užaugintiems YBCO epitaksiniams sluoksniams būdingi struktūros taškiniai defektai (deguonies vakansijos) ir trimačiai defektai (sraigtinės dislokacijos) (Sun *et al.* 1995, Van der Beek *et al.* 2002).

Sluoksnių MOCVD auginimo metodas leidžia tiksliai kontroliuoti daugiakomponenčio oksido sluoksnio sudėtį, augimo greitį, storį, be to, praktiniams taikymams svarbi galimybė tolygiai padengti didelius ir dažnai ne plokščius paviršius, taip pat svarbi technologijos kaina.

Norint paaiškinti superlaidininko YBCO mišrios fazės atsiradimą ir vystymąsi reikia sukurti tokias sąlygas, kuriose ji atsiranda. Mišrios fazės atsiradimą lemia kritiniai medžiagos parametrai, t. y. T_c, I_c, H_{c1}. Reikia sukurti superlaidžiame YBCO sluoksnyje sritis, kurių kritiniai parametrai būtų mažesni palyginus su kitomis medžiagos dalimis.

2.3. Superlaidžių darinių formavimas lazeriu

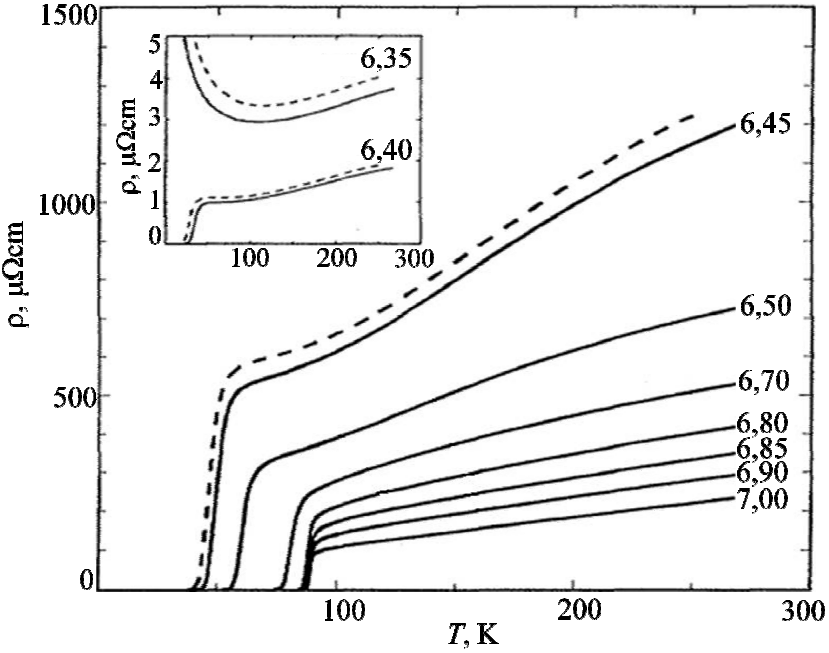
Krūvininkų tankis YBCO superlaidininke priklauso nuo deguonies kiekio Cu-O plokštumose, kurį galima keisti intervale x = 0–1,0 (Aleksashin *et al.* 1989). Pakitus deguonies kiekui Cu-O plokštumose, išsikreipia Cu-O_2 plokštumos. Dėl šios priežasties pakinta medžagos kritiniai parametrai. Nuo deguonies kiekio priklauso kritinė superlaidininko YBCO temperatūros T_c vertė (Alcacer 1989). 2.2 paveiksle vaizduojama YBCO kritinės temperatūros priklausomybė nuo deguonies kiekio kristalinėje gardelėje.



2.2. pav. Superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ kritinės temperatūros priklausomybė nuo deguonies kiekio (7 – x) elementarioje kristalinėje gardelėje (Martiensen *et al.* 2005)
Fig. 2.2. Critical temperature dependence on the amount of oxygen in the elementary crystalline lattice in the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Martiensen *et al.* 2005)

Didžiausios YBCO kritinės temperatūros T_c vertės išmatuojamos, kai deguonies kiekis elementarioje kristalinėje gardelėje Cu-O plokštumose 7 – x = 6,9 (Alcacer 1989). Mažėjant deguonies kiekiui mažėja ir kritinė superlaidininko temperatūra. Superlaidžiosios savybės visai išnyksta, kai deguonies kiekis 7 – x < 6,5, o esant dar mažesniam deguonies kiekiui medžiaga tampa didelės varžos puslaidininkiu (Aleksashin *et al.* 1989, Zelezny *et al.*

1995). Kambario temperatūroje superlaidininko YBCO krūvininkų tankis statmenai Cu-O_2 plokštumoms prilygsta išsigimusiems puslaidininkiams 1×10^{21} cm^{-3} – 6×10^{21} cm^{-3} (Jorgensen *et al.* 1990). Tačiau lygiagrečia Cu-O_2 plokštumoms kryptimi gali būti net dešimtis kartų didesnis (Aleksashin *et al.* 1989). Nuo deguonies kiekio YBCO kristalinės gardelės Cu-O plokštumose taip pat priklauso ir elektrinės *R*, ir savitosios elektrinės varžos ρ dydis kambario temperatūroje ir jų priklausomybės nuo temperatūros R(*T*) ir ρ(*T*) eiga. 2.3 paveiksle vaizduojama savitosios elektrinės varžos ρ(*T*) priklausomybė nuo temperatūros esant skirtingam deguonies kiekiui (7 – *x*) kristalinėje gardelėje.



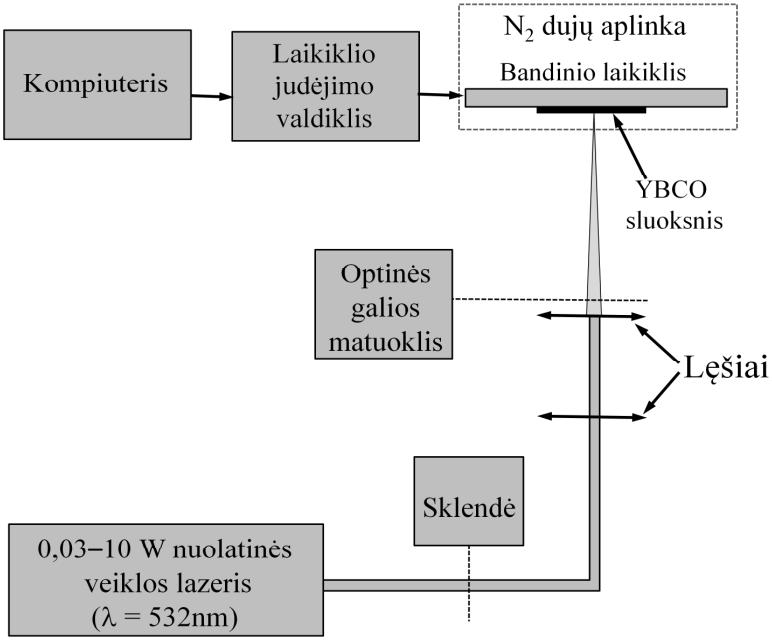
2.3. pav. Superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ savitosios elektrinės varžos priklausomybė nuo temperatūros, esant skirtingam deguonies kiekiui (7 – *x*) kristalinėje gardelėje (Jorgensen *et al.* 1990)

Fig. 2.3. Specific electrical resistance dependence on temperature in the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, providing that the amount of oxygen 7 – *x* varies in the crystal lattice (Jorgensen *et al.* 1990)

Mažiausios savitosios elektrinės varžos superlaidininke deguonies kiekis kristalinės gardelės Cu-O plokštumose yra didžiausias. Mažėjant deguonies kiekiui savitoji elektrinė varža didėja ir priklausomybė nuo temperatūros keičiasi greičiau.

Ankstesniuose darbuose (Sobolewski *et al.* 1994) nustatyta, jog tokias silpnojo superlaidumo sritis YBCO superlaidininko plonuose sluoksniuose galima sukurti paveikus medžiagą lazerio spinduliuote. Šviesą sugėrusios superlaidžiosios medžiagos sritys įkaista, o jose esančio deguonies atomų difuzija suintensyvėja ir, esant inertinių dujų aplinkai, deguonies kiekis medžiagoje sumažėja (Xie *et al.* 1989).

Superlaidžių darinių formavimas ir silpnojo superlaidumo sričių įrašymas dariniuose atliekamas Ar jonų 532 nm bangos ilgio nuolatinės veikos lazeriu, kurio galią galima keisti nuo 0,1 W iki 2,8 W, kambario temperatūroje inertinių (N_2) dujų aplinkoje. Lazerio spindulys mikroskopu sufokusuojamas į ~5 μm skersmens dėmę. 2.4 paveiksle pateikta blokinė kompiuteriu kontroliuojamos lazerinės įrangos schema.



2.4. pav. Kompiuteriu kontroliuojamos lazerinės įrangos, skirtos $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiųjų darnių su silpnojo superlaidumo sritimis formavimui, blokinė schema

Fig. 2.4. A schematic of computer-controlled laser-setup for formation of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting devices with regions of weak superconductivity

Specialia kompiuterine programa valdomas, dviem koordinatėmis judantis bandinio laikiklis užtikrina fiksuotą lazerio spindulio skenavimo superlaidžiojo sluoksnio paviršiumi greitį, kurį galima keisti intervale nuo 5 μm/s iki 50 μm/s.

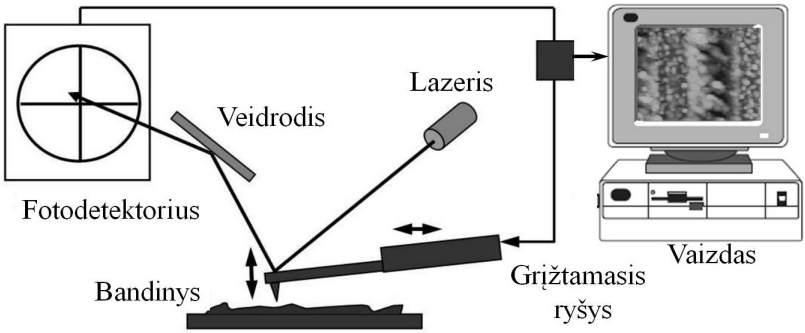
Disertacijoje aprašytuose nagrinėjamuose superlaidžiuosiuose YBCO sluoksniuose 2–2,3 W galios lazerio spinduliuote suformuojami dariniai, o 0,1–

0,6 W galios spinduliuote tuose dariniuose suformuojamos silpnojo superlaidumo sritys.

2.4. Lazeriu suformuotų superlaidžių darinių paviršiaus ir cheminės sudėties tyrimai

2.4.1. Skenuojantis tunelinis mikroskopas

Skenuojančio tunelinio mikroskopo (STM) veikimas paremtas tunelinės srovės tekėjimu tarp STM adatos ir bandinio paviršiaus (Bukauskas 2010). Šis metodas leidžia nustatyti paviršiaus topografiją, elektrinį laidumą ir kitas savybes. Principinė skenuojančio tunelinio mikroskopo veikimo schema pavaizduota 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Skenuojančio tunelinio mikroskopo veikimo schema (Bukauskas 2010)
Fig. 2.5. A scheme revealing working patterns of scanning tunneling microscope (Bukauskas 2010)

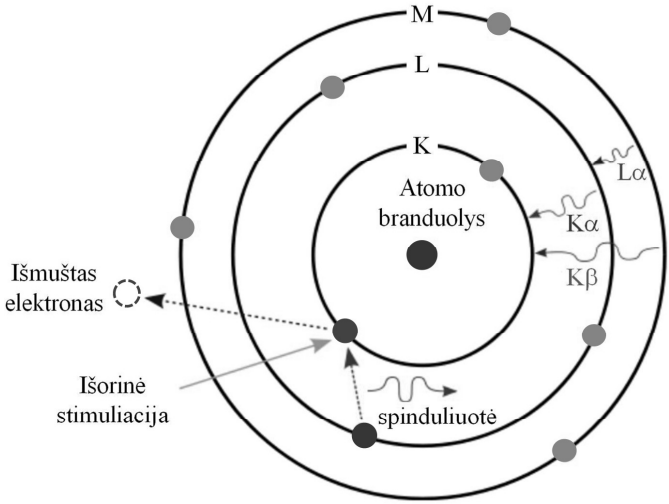
Metalinė STM adata priartinama prie tiriamojo bandinio paviršiaus tokiu atstumu, kad adatos ir bandinio atomų banginės funkcijos pradeda persikloti. Taip sudaromos sąlygos elektronams tuneliuoti iš bandinio arba į bandinį per oro tarpą. Adata juda x, y ir z kryptimis. Grįžtamuoju ryšiu palaikomas pastovus atstumas tarp skenuojamo paviršiaus ir adatos. Paviršiaus reljefas ir savybės yra atvaizduojami adatai tolygiai judant bandinio paviršiumi. Taip gaunami paviršiaus reljefo ir įvairių savybių spalvų žemėlapiai, kur tam tikra spalva atitinka aukščio ar kurio nors kito išmatuoto dydžio vertę.

Šiame darbe matavimams buvo naudotas STM mikroskopas Thermomicroscope Explorer ir Dimension 3100 Nanoscope IVa (Veeco Metrology Group), kurio skiriamoji geba x ašimi 2–5 nm, y ašimi 2–5 nm ir z

ašimi 0,05–1 nm. Superlaidūs YBCO dariniai su silpnojo superlaidumo sritimis tirti kambario temperatūroje normaliomis atmosferos sąlygomis.

2.4.2. Skenuojantis elektroninis mikroskopas su Rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopine sistema

Skenuojančio elektroninio mikroskopo veikimas paremtas sufokusuoto elektronų spindulio sąveika su bandinio paviršiumi. Elektronų spindulys išmuša antrinius elektronus, kurie patenka į detektorių ir į signalo stiprintuvą. Matuojant elektronų energijas, formuojamas paviršiaus vaizdas. Sąveikos srities gylis siekia iki 100 nm. Tai priklauso nuo elektronus greitinančios įtampos (buvo naudojama 15 kV įtampa) ir nuo medžiagos, į kurią spinduliuojama. Kuo sunkesni atomai, tuo mažiau elektronų pluoštelis prasiskverbia į medžiagą. Kartu su skenuojančiu elektroniniu mikroskopu buvo naudojama energijos dispersinė spektroskopijos sistema. Cheminių elementų kokybinės bei kiekybinės analizės metodas pagrįstas jų antrinės emisijos rentgeno spindulių bangos ilgių ir intensyvumų matavimu. Energijos dispersinės spektroskopijos veikimo principas pateiktas 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Energijos dispersinės spektroskopijos veikimo principas
Fig. 2.6. The working principle of EDS energy spectroscopy

Elektronų spindulys sužadina sluoksnio atomus, kurie vėliau pereidami į stabilią būseną išspinduliuoja rentgeno spindulius. Kiekvieno elemento atomai gali spinduliuoti tik tam tikros energijos rentgeno spindulius, todėl išspinduliuoti iš bandinio spinduliai spektre suformuoja charakteringas smailes.

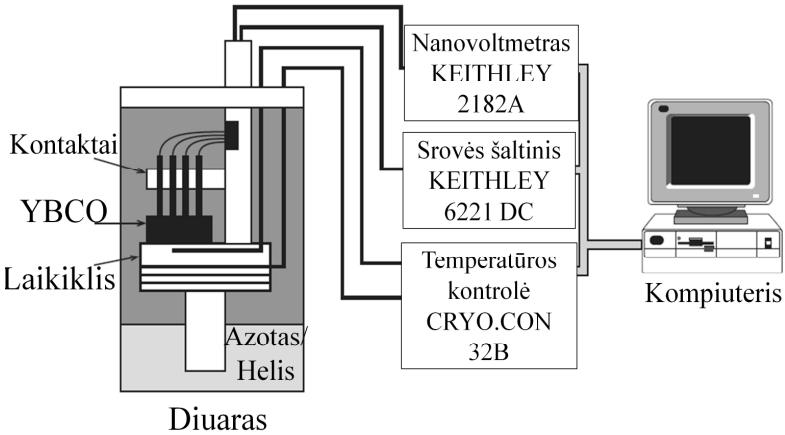
Disertacijoje cheminių elementų analizė atlikta Hitachi firmos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu TM300 su integruotu energijos dispersijos spektroskopu SwiftED3000.

2.5. Elektrinių kontaktų formavimas

Pagamintų plonųjų sluoksnių ir lazeriu suformuotų jų darinių elektrinės varžos ir voltamperinių charakteristikų tyrimams reikalingi elektriniai kontaktai, pasižymintys mažomis kontaktinės elektrinės varžos vertėmis. Tuo tikslu ant plonojo sluoksnio ar pagaminto darinio paviršiaus buvo užgarinami Ag elektrodai. Sidabro aikštelės ant tiriamųjų sluoksnių buvo formuojamos termiškai garinant. Vakuuminėje kameroje į garintuvo lovelį įdedamas nedidelis 0,1–0,3 g Ag gabalėlis. Tyrimams skirti sluoksniai buvo pridengiami metaline diafragma – specialia kauke (folija, turinčia specialias išpjovas). Bandiniai įtvirtinami 5 cm atstumu nuo garintuvo. Esant 1200 ^{o}C garintuvo temperatūrai, sidabras išgaruoja ir nusėda ant sluoksnio. Garinant slėgis kameroje – apie 10^{-5} Pa. Augimo greitis – apie 500 Å/min. Taip pagamintų elektrinių kontaktų sluoksnio storis siekia 0,1 μm. Po terminio garinimo dariniai su elektrodais papildomai 1 h kaitinami 300 ^{o}C temperatūroje deguonies dujose, siekiant pagerinti sidabro adheziją su superlaidininku.

2.6. Elektriniai matavimai

2.7 paveiksle pateikta blokinė elektrinių matavimų stendo schema.

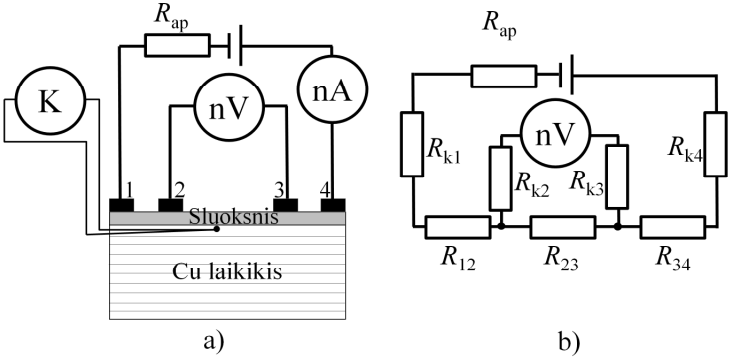


2.7 pav. Blokinė elektrinių matavimų schema
Fig. 2.7. The block scheme of the electrical measurements

Elektrinių savybių (pvz., elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros, kontaktinės varžos, voltamperinių charakteristikų) matavimai šiame darbe buvo automatizuoti. Įtampa tarp vidinių elektrinių kontaktų buvo matuojama nanovoltmetru (KEITHLEY 2182A). Bandinio temperatūrai nustatyti buvo naudojama temperatūros kontrolė (CRYO.CON 32B). Prie išorinių elektrinių kontaktų prijungtas pastoviosios srovės šaltinis (KEITHLEY 6221 DC). Gautiems signalams apdoroti kompiuteriu buvo naudojama LabVIEW programinėje terpėje sukurta programa.

2.6.1. Elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros matavimai

Matuojant superlaidaus darinio elektrinės varžos priklausomybę nuo temperatūros R(T), darinys prispaudžiamas ar priklijuojamas prie specialaus masyvaus varinio laikiklio, kuris patalpinamas į kamerą. Iš kameros išsiurbiamas oras pasiekiant 10^{-5} Pa slėgį. Tuomet darinys atšaldomas skystu azotu arba heliu. Matuojamojo darinio temperatūra registruojama ne mažesniu kaip 0,2 K tikslumu. Elektrinės varžos matavimai atliekami keturiais kontaktais, leidžiant pastoviąją elektros srovę tekėti išilgai suformuotu superlaidžiuoju dariniu. Elektros srovė matavimo metu nesikeitė, nes apkrovos elektrinė varža buvo parenkama žymiai didesnė $R_{ap} > 100R_b$ už darinio elektrinę varžą. Esant tokiai sąlygai elektros srovės stipris I išlikdavo pastovus, keičiant matavimo sąlygas (pvz., temperatūrą). Šių matavimų schema pavaizduota 2.8 paveiksle.



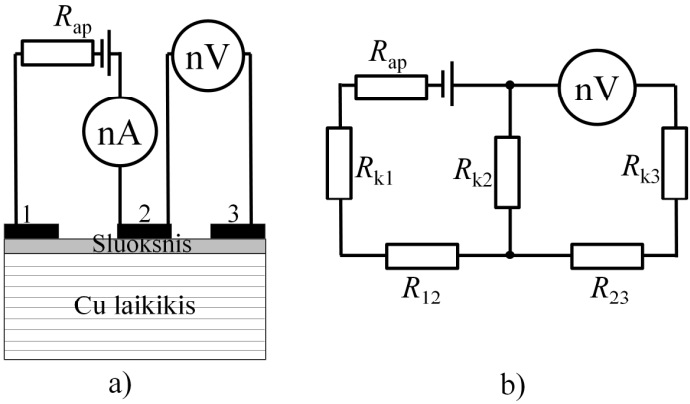
2.8 pav. Elektrinės varžos matavimo schemos keturių kontaktų metodu: a) elektrinė schema; b) ekvivalentinė schema. R_{ap} – apkrovos elektrinė varža; R_{k1}, R_{k2}, R_{k3}, R_{k4} – kontaktinės elektrinės varžos; R_{12}, R_{23}, R_{34} – superlaidaus darinio elektrinės varžos; K – temperatūros matuoklis

Fig. 2.8. Electrical resistance measurement schemes created on the basis of the four contact method: (a) an electrical scheme; (b) an equivalent scheme. R_{ap} – the load electrical resistance; R_{k2}, R_{k3}, R_{k4} – the contact electrical resistance; R_{12}, R_{23}, R_{34} – the electrical resistance of a superconductive device; K – temperature control

Prijungus elektros srovės šaltinį prie superlaidaus darinio 1 ir 4 elektrodų, išilgai darinio pradeda tekėti elektros srovė. Elektrinės varžos priklausomybė nuo temperatūros buvo matuojama šaldant bandinį nuo kambario ($T \approx 300$ K) iki skysto azoto ($T \approx 78$ K) ar helio ($T \approx 4{,}2$ K) temperatūros. Keičiant bandinio temperatūrą, buvo matuojama tarp 2 ir 3 elektrodų susidariusi elektrinė įtampa U_{23}.

2.6.2. Kontaktinės varžos matavimai

Kontaktinės sanglaudų (tarp elektrodo ir sluoksnio, tarp dviejų laidžiųjų sluoksnių arba tarp sluoksnio ir laidaus padėklo) elektrinės varžos buvo įvertinamos naudojant trijų elektrodų būdą, kaip parodyta 2.9 paveiksle.



2.9 pav. Kontaktinės elektrinės varžos matavimo schemos trijų kontaktų metodu: a) elektrinė schema; b) ekvivalentinė schema. R_{ap} – apkrovos elektrinė varža; R_{k1}, R_{k2}, R_{k3}, – kontaktinės elektrinės varžos; R_{12}, R_{23} – superlaidaus darinio elektrinės varžos

Fig. 2.9. Contact electrical resistance measurement schemes created on the basis of the three contact method: (a) an electrical scheme; (b) an equivalent scheme. R_{ap} – the load electrical resistance; R_{k1}, R_{k2}, R_{k3} – the contact electrical resistance; R_{12}, R_{23} – the electrical resistance in a superconductive device

Elektros srovės šaltinis prie bandinio buvo prijungiamas taip, kad elektros srovė per darinį tekėtų tarp 1 ir 2 elektrodų. Elektrinė įtampa U_{23} išmatuota tarp 2 ir 3 taškų.

2.7. Antrojo skyriaus išvados

Disertacijoje naudojamas MOCVD metodu užauginti aukštatemperatūrio superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniai:

1. MOCVD metodu užaugintuose epitaksiniuose superlaidžiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniuose gausu augimo metu susiformavusių defektų – sraigtinių dislokacijų. Šiuose sluoksniuose, lazerio spinduliuote sukuriami papildomi defektai – deguonies vakansijos. Šiuo metodu užaugintų sluosknių storis ir sudėtis yra tiksliai kontroliuojama.

2. MOCVD metodu užaugintiems superlaidiesiems $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniams pritaikyta darinių bei silpnojo superlaidumo sričių formavimo 532 nm bangos ilgio Ar jonų nuolatinės veikos lazeriu technologija.

3

Abrikosovo magnetiniai sūkuriai $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiuose dariniuose

Abrikosovo magnetinių sūkurių atsiradimas ir jų judėjimas YBCO superlaidininke ištirtas Ar jonų nuolatinės veikos 532 nm bangos ilgio lazerio spinduliuote suformuotuose superlaidžiuose dariniuose, turinčiuose silpnojo superlaidumo sritis.

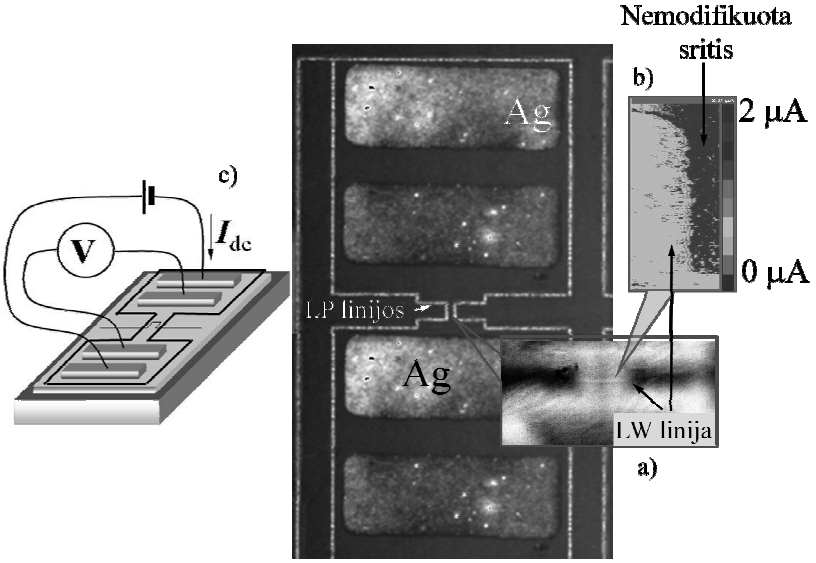
Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Jukna et al. 2013, Steponavičienė *et al.* 2009, 2010, 2011, 2011).

3.1. Superlaidūs $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniai, turintys silpnojo superlaidumo sritis

Disertacijoje tiriami aukštatemperatūriai superlaidieji YBCO sluoksniai užauginti Vilniaus universiteto Bendrosios ir neorganinės chemijos katedros laboratorijoje. MOCVD metodu suformuoti 0,3 μm storio YBCO sluoksniai papildomai 1,5–2 val. kaitinami 1 atm. slėgio deguonies dujų aplinkoje, esant 350 ^{o}C temperatūrai, siekiant medžiagą prisotinti deguonimi iki $x \sim 0$.

Deguonimi prisotintų YBCO sluoksnių kritinis superlaidžios srovės tankis siekia $J_c \sim 3$–6 MA/cm^2, esant $T = 78$ K temperatūrai, kritinė temperatūra $T_c = 91{,}2$ K (Abrutis *et al.* 1997). Rentgeno spindulių struktūrinė analizė parodė, jog gauti ortorombinės kristalinės struktūros YBCO superlaidūs sluoksniai tekstūruoti, *c* – kristaline ašimi orientuoti statmenai padėklo plokštumai (Abrutis *et al.* 1997).

Superlaidžiuose YBCO sluoksniuose 2,0–2,3 W lazerio spinduliuote suformuoti šeši 100 μm ilgio ir 50 μm pločio superlaidieji dariniai (3.1 pav. LP linija), kurių kiekvienam pagaminta po dvi plačias aikšteles, skirtas 4 kontaktų matavimo metodo elektriniams įvadams.



3.1 pav. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksnyje suformuotas superlaidusis darinys – optiniu mikroskopu gauta nuotrauka. Įkijoje a) magnetooptinių tyrimų $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio nuotraukoje – 280 G magnetinio lauko prasiskverbimas į silpnojo superlaidumo sritį. Įkijoje b) skenuojančiu tuneliniu mikroskopu gauta $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio nuotrauka kai $T = 300$ K. Įklijoje c) $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio elektrinė matavimų schema

Fig. 3.1. A view of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin film with laser-patterned (brighter) insulating lines. Bright areas correspond to higher transparency of the light when sample is illuminated from the bottom side. Inset a): magnetooptical image of the penetration of the 280 G magnetic field into the superconducting device containing laser-written line. Inset b) a photograph obtained at room temperature ($T = 300$ K) by means of the scanning tunneling microscope. Inset c) represents a schematic of a single superconducting device with region of weak superconductivity and electric scheme for measurements of device's electric properties

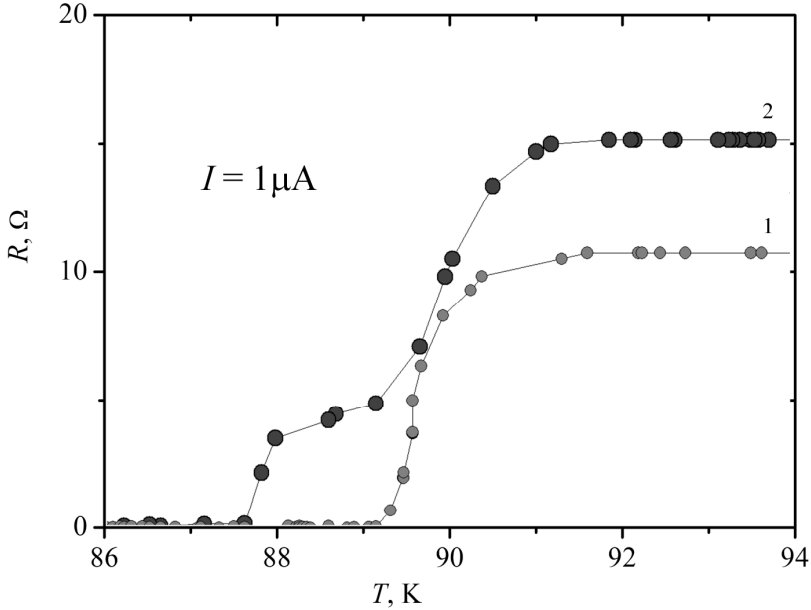
3.1 paveiksle pavaizduotas vienas superlaidusis YBCO darinys. Po superlaidžiųjų darinių suformavimo, tuo pačiu lazeriu, tik mažesne 0,1–0,6 W spinduliuotės galia penkiuose iš šešių darinių suformuojamos silpnojo superlaidumo (arba deguonimi dalinai nuskurdintos) sritys (3.1 pav. LW linija), kurios yra pagrindinis tyrimų objektas. Vienas darinys paliekamas be silpnojo superlaidumo srities tam, kad būtų galima palyginti lzerio spinduliuotės poveikį medžiagai tame sluoksnyje.

Optiniu mikroskopu gauta nuotrauka, kurioje matosi lazeriu suformuotas vienas iš šešių darinių, pateikta 3.1 paveiksle. Įklijoje a) pateikta magnetooptinių tyrimų rezutatas. Šviesesnės nuotraukos vietos žymi darinio vietas, kuriose įsiskverbęs magnetinis laukas. LP linijos – tai 2,0–2,3 W galios lazerio spinduliuote paveiktos medžiagos sritys, LW linijos – 0,1–0,6 W galios lazerio spinduliuotės poveikio medžiagai rezultatas. Išanalizavus magnetooptinių tyrimų nuotraukas nustatyta, jog išorinis ar elektros srovės, tekančios darniu, kuriamas magnetinis laukas įsiskverbia į medžiagą tose vietose, kurios yra paveiktos lazerio spinduliuotės. Šis tyrimas rodo, jog magnetinis laukas į YBCO darinius, kuriuose yra silpnojo superlaidumo sritys, skverbiasi pirmiausiai.

Skenuojančiu tuneliniu mikroskopu išmatuotas elektros srovės stiprs (3.1 pav. įklija (b)) suformuotuose superlaidžiuose dariniuose kambario temperatūroje (T = 300K). Elektros srovės stipris 0–2 μA pavaizduotas spalvinėje skalėje. Modifikuotų superlaidžiojo darinio vietų elektros srovės stipris silpnesnis nei 1 μA. Nepaveiktose vietose teka 1,8 μA elektros srovės stipris, t. y. 1,8 karto stipresnis nei modifikuotose vietose. Silpnesnė elektros srovė teka tomis darinio sritimis, kurių elektrinė varža yra mažesnė. Tiriamų silpnojo superlaidumo sričių elektrinė varža yra didesnė, tuomet kritiniai šių sričių parametrai (kritinė temperatūra T_c ir kritinis magnetinis laukas H_{c1}) mažesni, lyginant su darinio nemodifikuotomis sritimis. Kiekvienam iš šešių darinių termogarinimo metodu užgarinti elektrodai. Elektrinių matavimų schema vieno superlaidžiojo darinio atveju parodyta 3.1 paveikslo įklijoje (c).

3.2 paveiksle pateiktos elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros išmatuotos dariniuose su ir be silpnojo superlaidumo sričių, išilgai darinių tekant nuostoviajai I = 0,1 μA elektros srovei. Dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimi elektrinė varža normalioje fazėje 94–91 K yra 30% didesnė nei dariniuose be silpnojo superlaidumo sričių. Elektrinės varžos priklausomybė nuo temperatūros (3.2 pav. 1 kreivė) yra tipinė YBCO superlaidininkams dariniuose be silpnojo superlaidumo srities – 91,2 K temperatūroje prasideda fazinis virsmas ir 89 K temperatūroje elektrinė varža lygi 0 Ω. Dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis (3.2 pav. 2 kreivė) elektrinė varža, pasiekusi kritinę YBCO temperatūrą, pradeda staigiai mažėti kaip ir 1 kreivės atveju. Tačiau pasiekus 89 K elektrinė varža netampa lygi nuliui, toliau fiksuojami elektriniai

nuostoliai. Pasiekus 88,2 K temperatūrą vyksta antrasis fazinis virsmas – elektrinė varža tampa lygi nuliui. Dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis stebimas dvigubas fazinis virsmas: 91,2 K temperatūroje –aukštatemperatūrins fazinis virsmas, o žemesnėse temperatūrose – žematemperatūrinis fazinis virsmas.



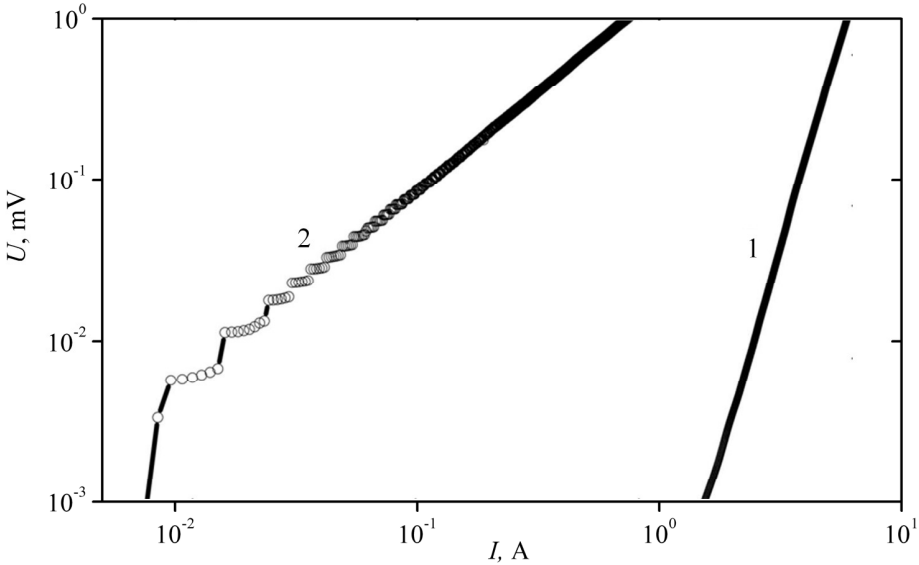
3.2 pav. Superlaidžiame $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksnyje suformuotų darinių elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros darinių be (1) ir su (2) silpnojo superlaidumo sritimi, tekant 1μA elektros srovei.

Fig. 3.2. Electrical resistance dependence on temperature of the devices of superconductive $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ layer without (1) and with (2) area of weak superconductivity when the flowing electrical current is 1 μA.

Tų pačių superlaidžiųjų YBCO darinių su silpnojo superlaidumo sritimi ir be jų išmatuotos voltamperinės charakteristikos pateiktos 3.3 paveiksle. Voltamperinės charakteristikos išmatuotos 88 K temperatūroje. 2 kreivė yra išmatuota darinyje su silpnojo superlaidumo sritimi. U(I) priklausomybė yra netiesinė (pateikta logaritminiame mastelyje), sudaryta iš elektrinės įtampos laiptelių. 1 kreivė yra išmatuota darinyje be silpnojo superlaidumo srities. Ši voltamperinė charakteristika nepasižymi elektrinės įtampos laipteliais. Parinkus 10 μV elektrinės įtampos kriterijų voltamperinėse charakteristikose nustatoma kritinės srovės I_c vertė.

Dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis kritinė srovė I_c yra 1000 kartų sipnesnė nei dariniuose be silpnojo superlaidumo sričių.

Elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros ir voltamperinės charakteristikos atitinka literatūroje pateiktus superlaidžiųjų darinių, sukurtų elektroninės litografijos būdu (Lin *et al.* 1996), sluoksnio storio periodinė moduliacija ar prie sluoksnio prispausta magnetinė juostelė su periodiniu magnetiniu įrašu (Yuzhelevski *et al.* 1999) ir kt. tyrimų rezultatus.



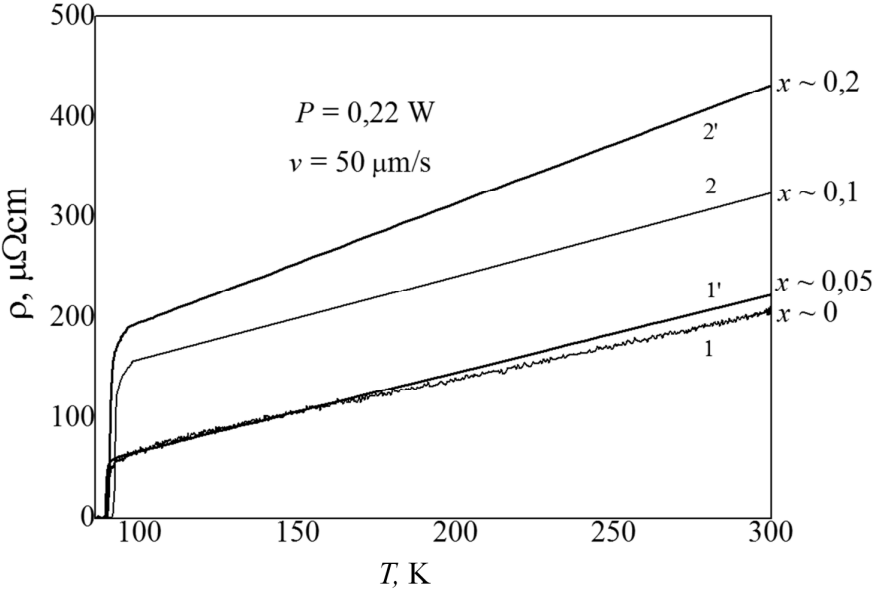
3.3 pav. Superlaidžiųjų $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių voltamperinės charakteristikos logaritminiame mastelyje. 1 – darinio be silpnosios superlaidumo srities, 2 – darinio su silpnąja superlaidumo sritimi

Fig. 3.3. The voltage – current dependences in the logarithmic scale of the devices of superconductive $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ layer without (1) and with (2) area of weak superconductivity

Iš voltamperinių charakteristikų, varžos priklausomybės nuo temperatūros bei magnetooptinių tyrimų matome, jog kritiniai parametrai T_c, I_c, H_{c1} yra mažesni dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis. Silpnojo superlaidumo sritys greičiau pereina į mišrią būseną nei nemodifikuotos sritys. Skirtumas tarp superlaidžiųjų darinių su ir be silpnojo superlaidumo sričių yra tik lazerio spinduliuotės poveikis formuojant silpnojo superlaidumo sritį todėl galima teigti, jog energijos nuostoliai, fiksuojami elektrinės varžos priklausomybėje nuo temperatūros, voltamperinėse charakteristikose žemose temperatūrose 89–

88,5 K, yra dėl mišrios fazės atsiradimo, t. y. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimo silpnojo superlaidumo sritimis.

3.4 paveiksle pateiktos elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros $\rho(T)$ ir $\rho(300\ K) = 210\ \mu\Omega\cdot cm$ (1'); $225\ \mu\Omega\cdot cm$ (1); $325\ \mu\Omega\cdot cm$ (2) ir $430\ \mu\Omega\cdot cm$ (2') išmatuotos dariniais tekant 0,1 mA stiprio elektros srovei, o silpnojo superlaidumo sritys suformuotos superlaidininko paviršiumi lazerio spindulio dėmei judant 50 μm/s greičiu.



3.4 pav. Superlaidžiųjų $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių savitosios elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros. 1 ir 2 – tai dariniai be, 1' ir 2' – dariniai su 0,22 W galios lazerio spinduliuote suformuotomis silpnojo superlaidumo sritimis

Fig. 3.4. Electrical resistance dependences on temperature of superconductive $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ devices. Devices 1 and 2 are laser untreated, devices 1' and 2' contain 0.22 W laser – formed weak superconductivity areas

Pradinis (t. y. prieš suformuojant silpnojo superlaidumo sritį) deguonies kiekis dariniuose įvertintas kambario temperatūros darinio savitosios elektrinės varžos vertes $\rho(300\ K)$ bei $\rho(T)$ priklausomybes lyginant su (Jones *et al.* 1993) darbe išmatuotomis priklausomybėmis tos pačios rūšies superlaidiems dariniams, turintiems skirtingą deguonies kiekį.

Deguonies kiekio pokytis gali vykti dėl deguonies atomų termiškai sužadintos difuzijos superlaidininke. Šviesos energija, sugerta superlaidininke, virsta Džiaulio šiluma. Esant lazerio spinduliuotės 0,22 W galiai ir šviesos

dėmės skenavimo greičiui 50 μm/s, optinė energija suteikta superlaidžiajai medžiagai sudaro 0,22 J. Santykinai mažame lazerio spinduliuotės paveiktame medžiagos tūryje sugėrus šviesą, YBCO medžiagos temperatūra gali padidėti net keliais šimtais laipsnių. Kitų autorių darbuose nustatyta, jog, esant 400–500 ^{o}C temperatūrai, dėl suintensyvėjusios deguonies difuzijos YBCO medžiagą galima prisotinti ar nuskurdinti deguonimi. Dėl perovskitinės medžiagos struktūros, deguonies difuzijos koeficientas net visa eile didesnis deguonies atomams difunduojant išilgai Cu-O ar Cu-O_2 plokštumų, jei lyginsime difuzijos koeficientą kryptimi statmenai joms. Todėl deguonis efektyviau pasišalina iš įkaitusių YBCO medžiagos sričių, kuriose, iki medžiagos sąveikos su lazerio šviesa, deguonies kiekis buvo mažesnis, t.y. buvo didesnis deguonies vakansijų skaičius.

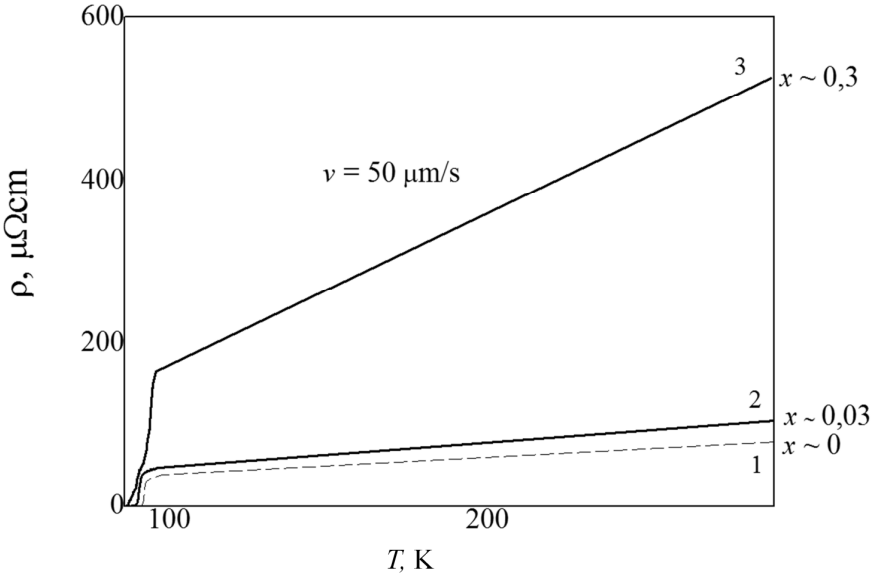
Pirmojo darinio (3.4 pav.) be silpnojo superlaidumo srities deguonies kiekis $x \sim 0$. Paveikus šį sluoksnį 0,22 W galios lazerio spinduliuote, esant inertinei dujų apsupčiai, sluoksnis nuskurdinamas deguonimi iki $x \sim 0{,}05$. Antrojo darinio iki sąveikos su intensyvia spinduliuote deguonies kiekis $x \sim 0{,}1$, o paveikus tos pačios galios lazerio spinduliuote, sluoksnio nuskurdinimo deguonimi laipsnis padidėja iki $x \sim 0{,}2$.

YBCO darinių, su lazeriu suformuota silpnojo superlaidumo sritimi, $\rho(T)$ eigos pobūdį lemia deguonimi stipriausiai nuskurdinta superlaidininko medžiagos dalis. Superlaidininko medžiagai sąveikaujant su šviesa, padidėjo ne tik darinio kambario temperatūros savitoji elektrinė varža, bet ir $\rho(T)$ eigos pobūdis. Jei savitosios elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros eiga, superlaidžiajam dariniui esant normalioje būsenoje (3.4 pav. 1 kreivė), aprašoma: $\rho(T) = 2{,}6\times10^{-7}+6{,}8\times10^{-8}\ T$ dėsniu, o darinį paveikus lazerio spinduliuojama šviesa ji pasikeičia į $\rho(T) = 1{,}2\times10^{-6} +7{,}8\times10^{-8}\ T$. Paveikus 0,22 W galios lazerio spinduliuote, minėto superlaidžiojo darinio kambario temperatūros savitoji elektrinė varža pakinta 1,07 karto. Didesnį kiekį deguonis praradusio 2–ojo bandinio savitosios elektrinės varžos polinkis (3.4 pav. 2‘ kreivė) pakinta stipriau, t. y. iš $\rho(T) = 7{,}5\times10^{-6}+8{,}3\times10^{-8}T$; į $\rho(T) = 7{,}7\times10^{-6}+ 1{,}2\times10^{-7}T$, o tuomet kambario temperatūros savitoji elektrinė varža padidėjo 1,33 karto, superlaidųjį darinį veikiant tokios pačios 0,22 W optinės galios lazerio spinduliuote, kaip ir pirmojo darinio atveju (3.4 pav. 1' kreivė).

Kaip matyti iš eksperimentinių kreivių 3.4 paveiksle, fiksuotos galios lazerio spinduliuotės poveikio rezultatas, esant fiksuotam lazerio šviesos dėmės skenavimo superlaidininko paviršiumi greičiui, priklauso nuo pradinio deguonies kiekio lazeriu nemodifikuotoje superlaidžiojoje medžiagoje. Mažesnio pradinio deguonies kiekio YBCO dariniuose (3.4 pav. 2 ir 2' kreivės), lazerio spinduliuotės poveikis sukuria palankesnes sąlygas deguonies išlaisvinimui iš superlaidžiosios medžiagos, o, dariniui esant inertinių dujų

aplinkoje, sąlygoja intensyvų superlaidininko medžiagos nuskurdinimą deguonimi. Kaip rodo eksperimentai, jei lazerio spinduliuotės nemodifikuotoje YBCO medžiagoje pradinis deguonies kiekis siekia $x \sim 0{,}1$, tai didelės galios lazerio spinduliu tokiame darinyje formuojant sipnojo superlaidumo sritis, savitoji darinio elektrinė varža ρ(300 K), sąskaita atsiradusios deguonimi nuskurdintos srities, gali padidėti beveik 1,33 karto, lyginant su atveju, kai pradinis deguonies kiekis lazerio spinduiouote nemodifikuotame darinyje $x \sim 0$ (3.4 pav. 1 ir 1' kreivės).

3.5 paveiksle 1 kreivė vaizduoja tipinę savitosios varžos priklausomybę nuo temperatūros superlaidžiame YBCO darinyje be silpnojo superlaidumo srities.



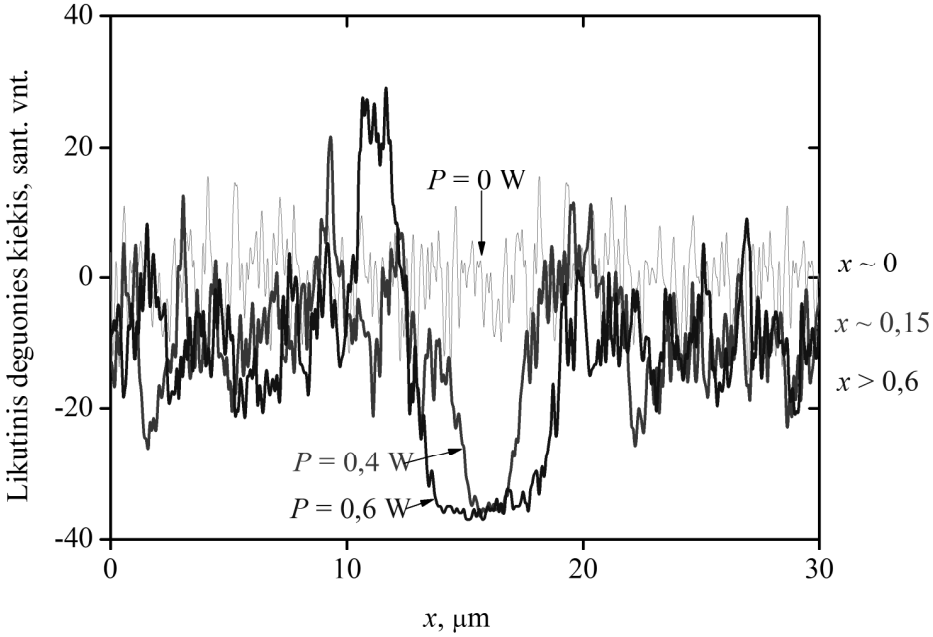
3.5 pav. Savitosios varžos priklausomybės nuo temperatūros $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniuose silpnojo superlaidumo sritis suformavus 0,22 W (2 kreivė) and 0,41 W (3 kreivė) galios lazerio spinduliu. 1 kreivė – darinio be silpnojo superlaidumo srities. Deguonies kiekis x nustatytas lyginat rezultatus su (Jones *et al.* 1993) tiems patiems sluoksniams

Fig. 3.5. The electric resistivity vs. temperature dependences of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ devices with LW line produced using 0.22 W (curve 2) and 0.41 W (curve 3) beam's power at room temperature. Curve 1 represents same dependence of the pristine (i.e. untreated by the LW procedures) device. Oxygen content *x* in the LW region has been extracted from results of electric measurements (Jones *et al.* 1993) assuming a correlation between remnant oxygen content and electric transport properties of oxygen-deficient $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films

Po silpnojo superlaidumo sričių suformavimo 0,22 W ir 0,41 W galios lazerio spinduliuote ir 50 μm/s skenavimo greičiu, darinio savitoji varža kambario temperatūroje padidėja nuo 105 μΩ cm (3.5 pav. 2 kreivė) iki 530 μΩ cm (3.5 pav. 3 kreivė). Padidinus lazerio spinduliuotės galią 1,9 karto elektrinė varža kambario temperatūroje pakinta apie 5 kartus, o deguonies kiekio pokytis apie 10 kartų.

Deguonies kiekio pokytis silpnojo superlaidumo srityse, suformuotose įvairios galios lazerio spinduliuote, pateiktas 3.6 paveiksle. Tyrimas atliktas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu su integruotu Rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopu. Šia sistema galima ištirti deguonies kiekį YBCO medžiagos nedidesniame nei 100 nm gylyje.

3.6 paveiksle atvaizduotas deguonies pasiskirstymas superlaidžiuose YBCO dariniuose skirtinga lazerio spinduliuotės 0,4 W ir 0,6 W galia sukurtose silpno superlaidumo srityse.



3.6 pav. Deguonies kiekio tyrimas 0,4 W ir 0,6 W galios lazerio spinduliuote sukurtose silpnojo superlaidumo srityse, lyginant jį su nemodifikuota (P = 0) W $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksnio vieta

Fig. 3.6. The residual amount of oxygen in laser treated area of the $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting film at 0.4 W (2 curve) and 0.6 W (3 curve) optical powers compare with oxygen content in laser untreated $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ material P = 0 W

Didesne 0,6 W optine galia veikiant YBCO sluoksnį, jame suformuojama beveik 2 kartus platesnė silpnojo superlaidumo sritis nei ją formuojant 0,4 W. Sąveikaujant su 0,6 W galios spinduliuote, lazeriu paveiktų superlaidžiojo darinio vietų temperatūra aukštesnė, nei 0,4 W atveju, tad aukštesnės temperatūros atveju reiktų tikėtis intensyvesnės ir deguonies difuzijos. Greičiausiai intensyvesnės deguonies difuzijos reiškiniu ir dėl to netolygiu deguonies pasiskirstymu silpnojo superlaidumo srities artumoje galima būtų paaiškinti smailės, rodančios perteklinį deguonies kiekį YBCO medžiagoje, atsiradimą (3.6 pav.).

Superlaidžiajame darinyje suformuodami silpnojo superlaidumo sritis padidiname deguonies vakansijų skaičių modifikuotose srityse. Šios sritys yra silpnojo superlaidumo sritys, kuriose kritiniai parametrai mažesni palyginus su lazerio spinduliuote nemodifikuota dalimi. Silpnojo superlaidumo sritys – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių kanalai, ir magnetinis laukas skverbiasi į jas pirmiausiai todėl, kad superlaidininko kritiniai parametrai yra mažesni, nes turi daugiau defektų.

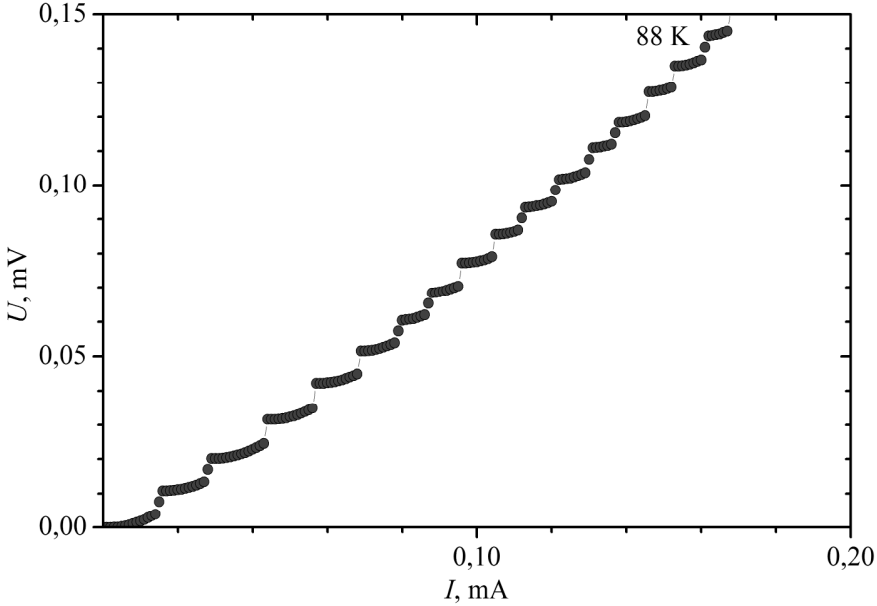
3.2. Abrikosovo magnetinių sūkurių tankio ir koherentinio judėjimo tyrimas

Suformuotuose YBCO dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis elektros srovės kuriamas ar išorinis magnetinis laukas prasiskverbia į kanalo sritį Abrikosovo magnetiniais sūkuriais.

3.2.1. Voltamperinės charakteristikos elektrinės įtampos laiptelio analizė

Voltamperinės charakteristikos išmatuotos siaurame temperatūrų intrevale 89–86 K, kuriame stebimas žematemperatūrinis fazinis virsmas varžos priklausomybėje nuo temperatūros. Išmatuotų eksperimentinių voltamperinių charakteristikų pavidalą lemia tik reiškiniai, vykstantys dėl lazerio spinduliuote suformuotų silpnojo superlaidumo sričių.

3.7 paveiksle pateikiama voltamperinė charakteristika išmatuota superlaidžiame YBCO darinyje su Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalu 88 K temperatūroje.

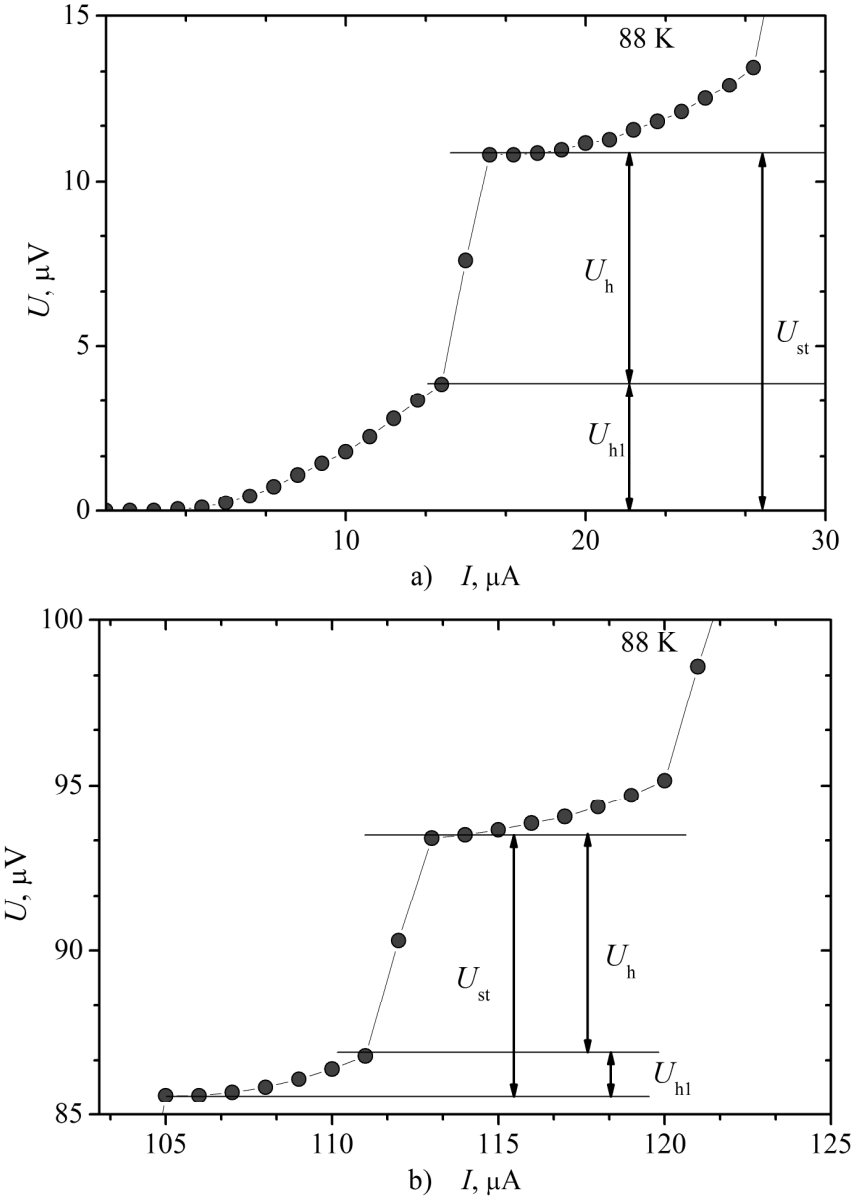


3.7 pav. Superlaidaus $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio (su suformuota silpnojo superlaidumo sritimi) voltamperinė charakteristika 88 K temperatūroje

Fig. 3.7. The voltage – current dependence of the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ containing the area of weak superconductivity providing that temperature range is 88 K

Šioje temperatūroje išmatuota U(*I*) charakteristika (kaip ir kitose temperatūrose išmatuotos voltamperinės charakteristikos) yra netiesinė ir sudaryta iš elektrinės įtampos laiptelių, kurių kiekvienas turi greitąją U_h ir lėtąją U_{h1} elektrinės įtampos dalį. 3.8 paveiksle parodyta elektrinės įtampos laiptelio sandara.

Suskaičiavus iki 120 laiptelio, greitosios dalies aukštis keičiantis elektros srovės stipriui 0 iki 0,6 mA nekinta ir yra lygus $U_h \sim 7{,}8$ μV. Taip pat elektrinės įtampos laiptelio aukštis U_h beveik nepriklauso nuo temperatūros. Pastovus elektrinės įtampos laiptelio U_h rodo pastovų reiškinį. Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai įsiskverbia į medžiagą tik kaip magnetinio srauto kvantai – visada vienodas magnetinio lauko dydis. Šis faktas leidžia daryti prielaidą, kad elektrinės įtampos naujo laiptelio atsiradimas voltamperinėje charakteristikoje yra papildomos Abrikosovo magnetinio sūkurio ir antisūkurio poros įsiskverbimas į suformuotą darinyje silpnojo superlaidumo sritį. Kuo stipresnė elektros srovė teka dariniu, tuo stipresnis jos kuriamas magnetinis laukas, tuo disenis elektrinės įtampos laiptelių skaičius ir daugiau Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių įsikverbia į silpnojo superlaidumo sritį.

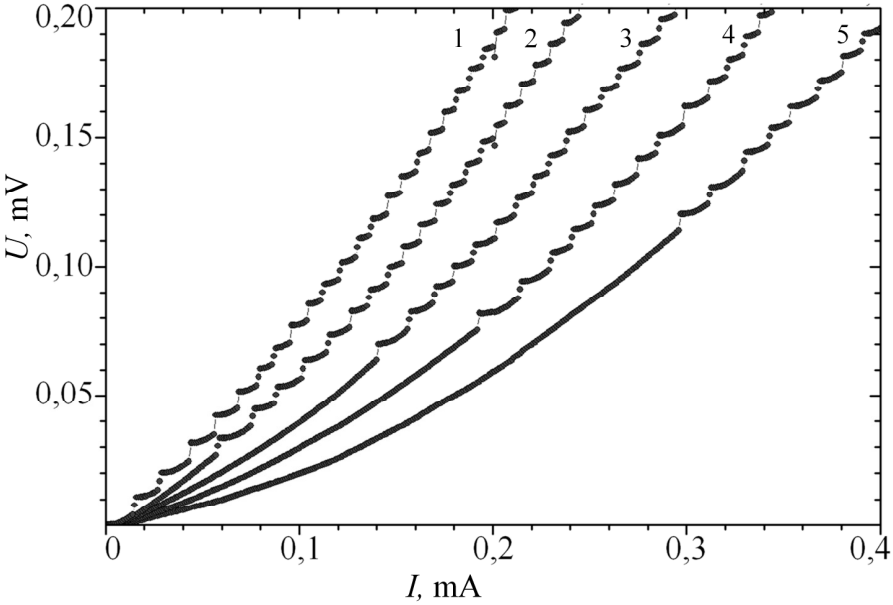


3.8 pav. Superlaidaus $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio, su silpnojo superlaidumo sritimi, elektrinės įtampos laiptelis, kai temperatūra T = 88 K. a) I = 0–15 μA; b) I = 105–112 μA

Fig. 3.8. The electrical voltage step of superconductive $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ devices containing the area of weak superconductivity, when the temperature T = 88 K. a) I = 0–15 μA; b) I = 105–112 μA.

Tuo tarpu lėtosios elektrinės įtampos laiptelio dalis keičiantis elektros srovės stipriui kinta. Kai elektros srovės stipris intervale 0–15 μA, lėtosios elektrinės įtampos laiptelio dalis U_{h1} = 3,9 μV. Elektros srovės stipriui pakintus intervale 105–112 μA, lėtosios elektrinės įtampos laiptelio dalis U_{h1} = 1 μV. Palyginę voltamperinių charakteristikų elektrinės įtampos laiptelių lėtąsias dalis $U_{h1,}$ matome, kad padidėjus elektros srovės stipriui apie 10 kartų šios dalies elektrinė įtampa sumažėja apie 4 kartus. Tai galima paaiškinti tuo, kad tekant stipresnei elektros srovei, kuriama stipresnė Lorenco jėga, kuri veikia Abrikosovo magnetinius sūkurius ir verčia juos koherentiškai judėti kanale. Kuo stipresnė Lorenco jėga, tuo lengviau Abrikosovo magnetiniai sūkuriai atitrūksta nuo prieraišos centrų, tuo mažesnė energijos sklaida ir elektrinė varža.

Eksperimentinės voltamperinės charakteristikos išmatuotos 1 – 88,5 K, 2 – 88,3 K, 3 – 88 K, 4 – 87,6 K, 5 – 87,5 K temperatūrose pateiktos 3.9 paveiksle.



3.9. pav. Superlaidaus $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio su silpnojo superlaidumo sritimis voltamperinės charakteristikos: 1 – 88,5 K; 2 – 88,3 K; 3 – 88 K; 4 – 87,6 K; 5 – 87,5 K
Fig. 3.9. The voltage – current dependences of the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ containing the area of weak superconductivity: 1 – 88.5 K; 2 – 88.3 K; 3 – 88 K; 4 – 87.6 K; 5 – 87.5 K

Temperatūros, kuriose išmatuotos voltamperinės charakteristikos, pasirinktos neatsitiktinai. Elektrinės varžos priklausomybėse nuo temperatūros

R(T) šiame temperatūrų intervale 89–86,7 K stebimas žematemperatūrinis fazinis virsmas. Palyginus voltamperines charakteristikas, išmatuotas superlaidžiuose dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis šių temperatūrų intervale, matosi, kad žemesnėse temperatūrose elektrinės įtampos laipteliai atsiranda tekant stipresnei elektros srovei nei aukštesnėse temperatūrose.

Elektrinės įtampos laiptelio atsiradimas voltamperinėje charakteristikoje siejamas su Abrikosovo magnetinio sūkurio ir antisūkurio poros įsiskverbimu ir judėjimu darinio silpnojo superlaidumo sritimi. Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai gali judėti pavieniai, grupelėmis nuo vienų prieraišos centrų atitrūkę, prikimba prie kitų prieraišos centrų. Toks Abrikosovo sūkurių judėjimas voltamperinėse charakteristikose nepasireiškia elektrinės įtampos laipteliai. Kai Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai pradeda judėti visi, kai magnetinio sūkurio ir antisūkurio užgimimo laikas tampa lygus magnetinių sūkurių ir antisūkurių lėkio iki anihiliacijos linijos ir anihiliacijos laikui yra tenkinama koherentinio judėjimo sąlyga. Elektros srovės kuriama Lorenco jėga yra lygi ar disenė už prieraišos centrų kuriama prieraišos jėga. Pirmojo elektrinės įtampos laiptelio atsiradimas voltamperinėje charakteristikoje rodo, jog yra tinkamos sąlygos koherentiniam Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui. 87,5 K temperatūroje voltamperinėje charakteristikoje elektrinės įtampos laiptelis atsiranda tekant 0,3 mA elektros srovės stipriui, tuo tarpu 88,5 K temperatūroje elektrinės įtampos laiptelis atsiranda iškart tik pradėjus tekėt kritinei srovei. Lorenco jėga, kurią kuria dariniu tekanti 0,02 mA elektos srovė 88,5 K temperatūroje yra mažesnė, nei Lorenco jėga 87,5 K temperatūroje, kurią kuria 0,3 mA elektros srovė. Vadinasi žemesnėse temperatūrose prieraišos jėga santykinai stipresnė palyginti su aukštesnėmis temperatūromis, todėl reikia stipresnės elektros srovės, kuri sukurtų ir priverstų koherentiškai judėti Abrikosovo magnetinius sūkurius. Temperatūrose 87,5 K; 87,6 K; 88 K; 88,3 K Abrikosovo magnetiniai sūkuriai, įsiskverbę į darinį, prikimba prie prieraišos centrų ir nejuda arba juda nekoherentiškai tol, kol yra pasiekiama koherentinio judėjimo sąlyga.

3.8 paveiksle pateikta voltamperinės charakteristikos elektrinės įtampos laiptelio struktūra, kuria remiantis galima išreikšti U_{h1} dalį:

$$U_{h1} \approx U_{st} - U_h . \tag{3.1}$$

Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo greitį galima išreikšti lygtimi:

$$\eta v \sim F_L - f_P , \tag{3.2}$$

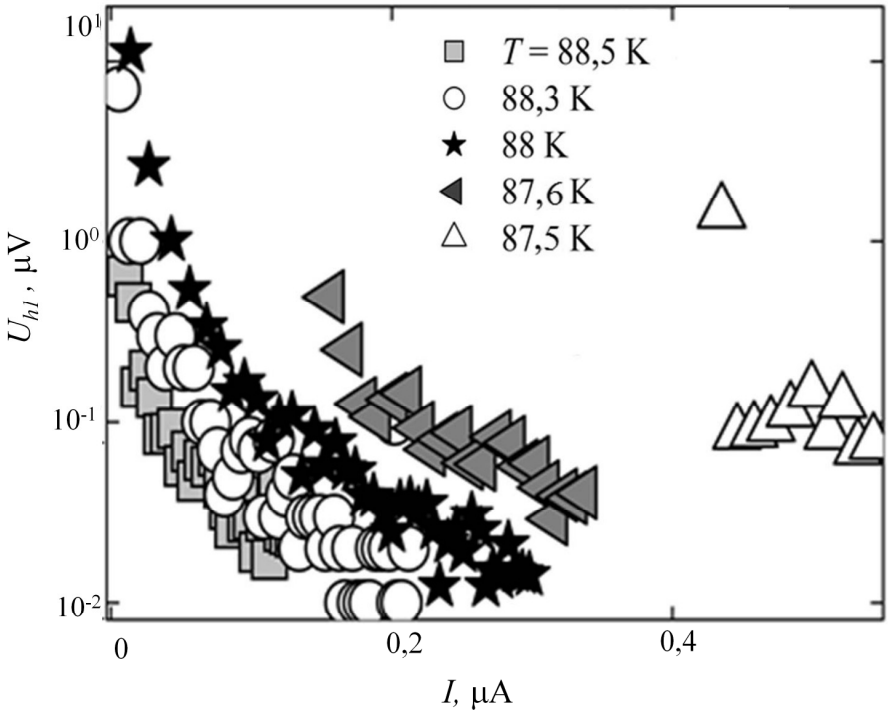
čia v – Abrikosovo magnetinių sūkurių greitis, $\eta(B, T)$ – klampos koeficientas, kuris yra magnetinio lauko indukcijos B ir temperatūros T funkcija, F_L – Lorenco jėga, kuriama elektros srovės stiprio, tekančio superlaidžiuoju dariniu:

$$F_L \sim I\Phi_0 \sim ma \,, \tag{3.3}$$

čia I – elektros srovės stipris, tekantis superlaidžiuoju dariniu, m - Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių „efektinė masė“, a – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių pagreitis. Lorenco jėga F_L tiesiog proporcinga elektrinei įtampai U_{h1}, nes didėjant elektros srovės stipriui daugėja Abrikosovo magnetinių sūkurių ir didėja jų greitis vieno elektrinės įtampos laiptelio atveju:

$$U_{h1} \sim N\Phi_0 v = Bv \sim ma \,. \tag{3.4}$$

3.10 paveiksle pateikiama lėtosios elektrinės įtampos laiptelio dalies U_{h1} priklausomybė nuo elektros srovės stiprio skirtingose temperatūrose.

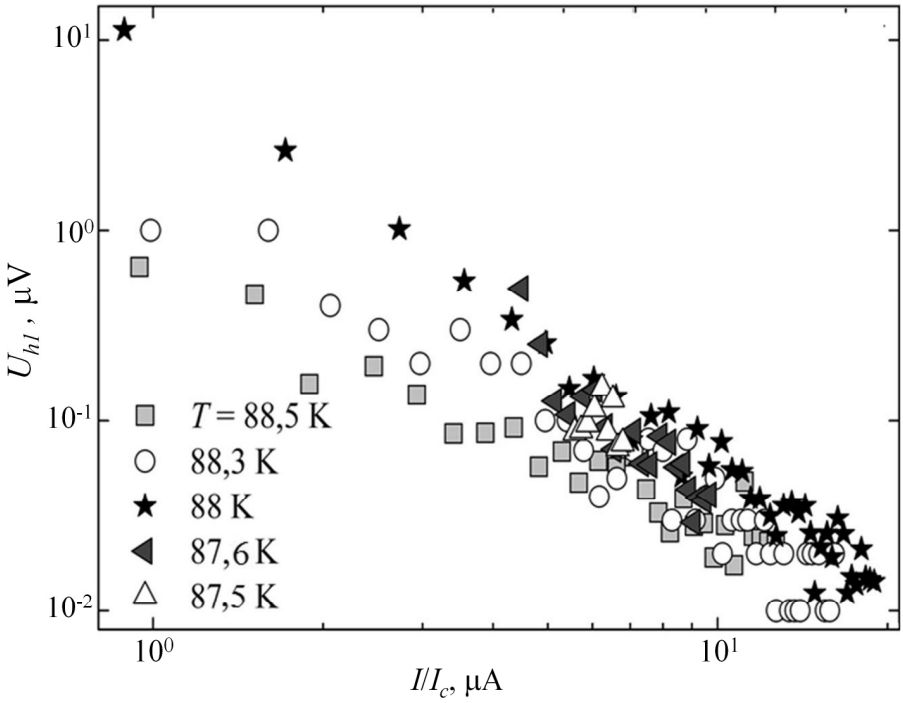


3.10 pav. Elektrinės įtampos U_{h1} dalies priklausomybė nuo elektros srovės stiprio logaritminiame mastelyje, kai temperatūra T= 87,5; 87,6; 88; 88,3 ir 88,5 K
Fig. 3.10. The voltage U_{h1} dependence on the electrical current on logarithmic scale, when the temperature is T= 87.5; 87.6; 88.0; 88.3 and 88.5 K

Palyginus elektrinės įtampos laiptelio U_{h1} priklausomybes nuo elektros srovės stiprio įvairiose temperatūrose gauta, kad žemesnėje temperatūroje

87,5 K, 87,6 K U_{h1} mažėja greičiau nei aukštesnėje. Tai dar kartą parodo, kad žemesnėse temperatūrose skirtumas tarp prieraišos jėgų yra didesnis. Vadinasi, formuojant silpnojo superlaidumo sritis, t. y. sukuriant didesnį deguonies vakansijų skaičių, santykinai sumažinama prieraišos jėgą. Tai leidžia kontroliuoti Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių koherentinį judėjimą.

3.11 paveiksle pateikta elektrinės įtampos laiptelio dalies U_{h1}, atsakingos už koherentinį Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimą (energijos sklaidą), priklausomybė nuo santykinio elektros srovės stiprio $U_{h1}(I/I_c)$. Visose tirtose temperatūrose Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų pasiskirstymas yra nehomogeninis. Tai paaiškinama tuo, kad netolygus elektros srovės tankis kanale iššaukia nehomogenišką elektros srovės kuriamo arba išorinio magnetinio lauko prasiskverbimą į superlaidųjį darinį su silpnojo superlaidumo sritimi.



311 pav. Elektrinės įtampos U_{h1} dalies priklausomybė nuo elektros srovės stiprio log – log mastelyje, kai temperatūra T = 87,5; 87,6; 88,0; 88,3 ir 88,5 K

Fig. 3.11. The voltage U_{h1} dependence on the electrical current on log-log scale, when the temperature is T = 87.5; 87.6; 88.0; 88.3 and 88.5 K

Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių poros juda išilgai kanalo dalių, kurios orientuotos statmenai elektros srovei, tekančiai dariniu. Didėjant

elektros srovės stipriui, didėja Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių tankis lazeriu įrašytame kanale, taip pat stiprėja ir sąveika tarp jų. Kai $I \geq I_c$, Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai, įsiskverbę į silpnojo superlaidumo sritį, stipriai susispaudžia.

Elektros srovės kuriama Lorenco jėga F_L veikia visą magnetinių sūkurių ir antisūkurių gardelę kaip kietą kūną ir jų greičio pasikeitimas priklauso nuo santykio tarp Lorenco jėgos ir prieraišos jėgos kanale. Šį santykį iš anksto nulemia prieraišos centrai silpnojo superlaidumo srityse – kanaluose.

Superlaidžių YBCO darinių, kuriuose yra silpnojo superlaidumo sritys, voltamperinių charakteristikų tyrimai leidžia daryti išvadą, kad elektrinės įtampos laipteliai voltamperinėse charakteristikose yra Abrikosovo magnetinių sūkurių atsiradimo ir jų koherentinio judėjimo rezultatas.

3.2.2. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių tankis

Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių skaičius N įvertintas iš eksperimentinių voltamperinių charakteristikų, išmatuotų dariniuose su silpnojo superlaidumo sritimis, superlaidžiuoju YBCO dariniu tekant 0,04; 0,25; 0,46 ir 0,7 mA stiprio elektros srovei. Voltamperinėje charakteristikoje elektrinę įtampą U, atitinkančią tam tikrą laiptelių skaičių padalinus iš elektrinės įtampos laiptelio aukščio U_h gaunamas Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius, įsiskverbęs į silpnojo superlaidumo sritį:

$$N = \frac{U}{U_h}. \tag{3.5}$$

Kad Abrikosovo magnetiniai sūkuriai įsiskverbtų į superlaidžios fazės medžiagos dalį, jis turi turėti kondensacijos energijos, kad tą dalį paverstų į normalios fazės medžiagą (Albrecht 2003):

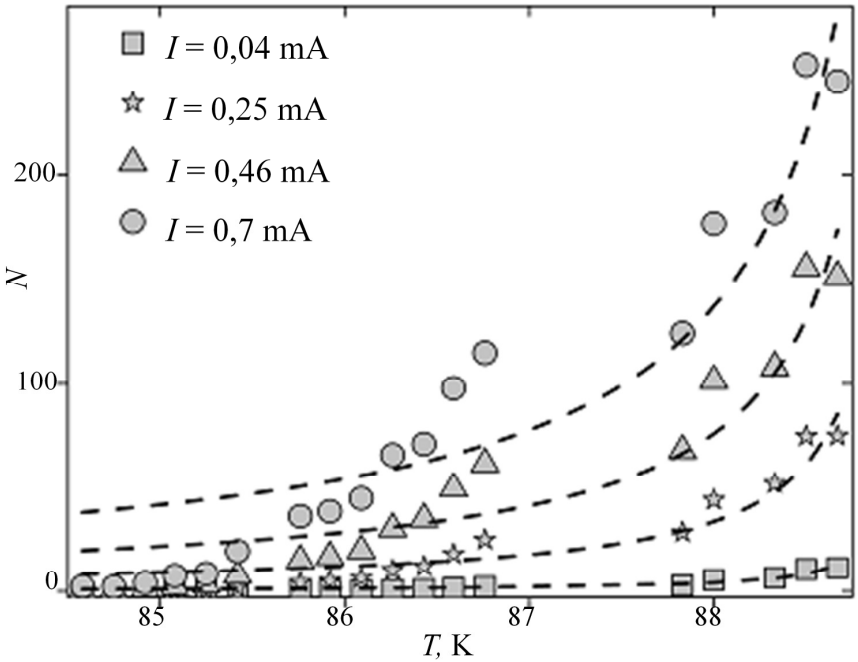
$$E(T) = \frac{\Phi_0^2}{4\pi\mu_0\lambda_{ab}^2(T)}. \tag{3.6}$$

Šios energijos Abrikosovo sūkuriams ir antisūkuriams suteikia dariniu tekanti elektros srovė. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius atvirkščiai proporcingas kondensacijos energijai (Albrecht 2003):

$$N \approx A\frac{1}{E(T)}, \tag{3.7}$$

čia A – tapatinimo parametras kinta intervale nuo $3*10^{-12}$ iki $2*10^{-10}$, kai dariniu teka elektros srovė, kurios stipris kinta nuo 0,04 mA iki 0,7 mA.

3.12 paveiksle pateikta Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičiaus priklausomybė nuo temperatūros (simboliai) superlaidžiajame YBCO darinyje su silpnojo superlaidumo sritimi, tekant 0,04; 0,25; 0,46; 0,7 mA stiprio elektros srovei:



3.12 pav. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičiaus *N* priklausomybė nuo temperatūros *T* (simboliai). Punktyrinės linijos rodo atvirkštinę kondensacijos energijos priklausomybę nuo temperatūros, dariniu tekant elektros srovei I = 0,04; 0,25; 0,46; 0,7 mA

Fig. 3.12. The pairs of Abrikosov magnetic vortices/antivortices *N* dependence on temperature *T* (characters). The dotted line indicates the inverse condensation energy dependence on temperature, when the flowing electrical current I = 0.04; 0.25; 0.46; 0.7 mA

88 K temperatūroje elektros srovės stipriui sustiprėjus 17,5 karto, t. y. nuo 0,04 mA iki 0,7 mA, Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius padidėja 11 kartų. Punktyrinės linijos yra atvirkštinė Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų kondensacijos energijos priklausomybė nuo temperatūros. Palyginus Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių kondensacijos energiją (apskaičiuota teoriškai) su jų porų skaičiumi (apskaičiuota iš eksperimentinių duomenų) matosi, kad skaičiavimų rezultatai aukštesnėse temperatūrose 87–89 K sutampa, o žemesnių temperatūrų intervale

84,5–87 K stiprėjant elektros srovės stipriui, tekančiam superlaidžiuoju dariniu su silpnojo superlaidumo sritimi nuo 0,04 mA iki 0,7 mA, skaičiavimų rezultatai nesutampa. Žemesnių temperatūrų intervale stebimas Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių staigesnis skaičiaus mažėjimas pagal eksperimentinius rezultatus yra dėl to, kad magnetiniai sūkuriai nejuda arba juda nekoherentiškai, nes veikia stipresnė prieraišos jėga nei Lorenco jėga. Pagal kondensacijos energijos skaičiavimo rezultatus, esant fiksuotai temperatūrai, kuo stipresnis elektros srovės stipris, tuo daugiau ir greičiau magnetinių Abrikosovo sūkurių ir antisūkurių koherentiškai juda statmenai elektros srovės tekėjimui. Tai aiškiai matosi aukštesnių temperatūrų intervale.

3.2.3. Abrikosovo magnetinių sūkurių plotas

Į superlaidųjį darinį, esant tempertaūrai $T < T_c$ ir tekant elektros srovei, kurios stipris I artimas kritiniam elektros srovės stipriui I_c, skverbiasi magnetinio lauko srauto kvantas – Abrikosovo magnetinis sūkurys ir antisūkurys:

$$\Phi_0 = BS\,, \tag{3.8}$$

S – magnetiniu sūkuriu apribotas superlaidžiosios medžiagos plotas priklausantis nuo temperatūros dėsniu:

$$S \sim 2\xi^2(T) \sim \xi^2(0)/(T_c - T)^{1/2}\,. \tag{3.9}$$

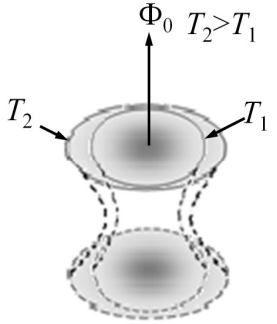
Abrikosovo magnetiniu sūkuriu ar antisūkuriu „pagauta“ magnetinio lauko indukcija turėtų kisti atvirkščiai proporcingai magnetiniu sūkuriu ribojamo ploto kitimui:

$$B \sim I \sim 1/\xi^2(T) \sim (T_c - T)^{1/2}/\xi^2(0)\,. \tag{3.10}$$

Įvertinus pavienio magnetinio sūkurio plotą fiksuotoje temperatūroje, galima suskaičiuoti kiek kartų jis turėtų pakisti, pakitus temperatūrai vienu laipsniu. 3.13 paveiksle pavaizduotas Abrikosovo magnetinys sūkurys, kai $T_1 < T_2$.

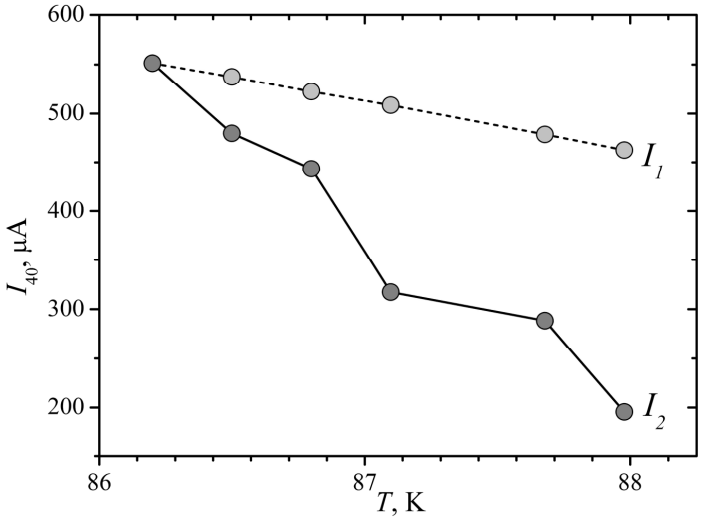
Iš voltamperinės charakteristikos, esant T = 87,6 K, randamas elektros srovės stipris, kuriam esant superlaidžiojo darinio silpnojo superlaidumo srityje įsiskverbia fiksuotas sūkurių ir antisūkurių porų skaičius (*pvz.* N = 70) (3.14 pav. I_2 kreivė).

Suskaičiavus kiek kintant temperatūrai pakinta magnetinių sūkurių plotas S, įvertinama kiek turėtų pakisti magnetinio lauko indukcija B, kurios reikia sūkuriui įsiskverbti į superlaidininką, temperatūrai pakitus 1 laipsniu.



3.13 pav. Abrikosovo magnetiniu sūkuriu apribotas superlaidininko plono sluoksnio plotas esant dviems skirtingoms temperatūroms $T_1 < T_2$, žemesnėms nei kritinė superlaidininko temperatūra T_c

Fig. 3.13. The area of Abrikosov magnetic vortex versus temperature of the superconducting thin film at two different temperatures $T_1 < T_2$, both below the critical temperature of the superconductor T_c



3.14 pav. Elektros srovės stiprio, sukuriančio 70 sūkurių ir antisūkurių porų superlaidžiojo darinio sūkurių kanale, priklausomybė nuo darinio temperatūros temperatūrų intervale, kuriame stebėtas koherentinis Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimas. I_2 – eksperimentuose stebėtos elektros srovė kitimas nuo temperatūros, o I_1 – ta pati srovė, įvertinta iš lygčių 3.8–3.10

Fig. 3.14. The electric current which creates 70 vortex-antivortex pairs in the channel area of the superconducting microbridge, versus temperature of microbridge. The I_1 represents experimentally measured current values and I_2 represents case of the same bias current which has been estimated by means of equations 3.8–3.10

Magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius priklauso nuo superlaidžiuoju dariniu tekančio srovės stiprio (ja kuriamo magnetinio lauko stiprio), magnetinių sūkurių kondensacijos energijos ir superlaidininko temperatūros, savo ruožtu sąlygojančios Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičiaus bei jų kondensacijos energijos kitimą.

Įvertinus eksperimentinius duomenis matyti, jog superlaidžiojo darinio temperatūrai padidėjus nuo 86,6 K iki 87,6 K, elektros srovės stipris, sukuriantis 70 sūkurių ir antisūkurių porų, pakinta nuo 565 μA iki 242 μA (3.14 pav. I_2 kreivė).

Įvertinus elektros srovės stiprio, sukuriančio tą patį 70 Abrikosovo sūkurių ir antisūkurių porų skaičių, vertę iš 3.8–3.10 lygčių ir iš sūkurio kondensacijos energijos kitimo nuo temperatūros (3.12 pav.), matosi, jog pagal eksperimentinius duomenis kitimas yra staigesnis nei pagal teorinius.

3.14 paveiksle elektros srovės stipris I_1 (punktyrinė linija, teoriniai skaičiavimai), kinta nuo 550 μA iki ~ 500 μA, t. y. 1,1 karto ir elektros srovės stipris I_2 superlaidžiojo darinio temperatūrai padidėjus vienu laipsniu pkinta 2 kartus. Silpnesnė elektros srovė I_2, esant temperatūrai T = 87,6 K darinyje sąlygoja mažesnius elektrinės energijos nuostolius, o, tuo pačiu, jame sukuria mažesnę elektrinę įtampą, nei I_1 atveju, suskaičiuota iš lygčių 3.8–3.10 tam pačiam temperatūrų intervalui.

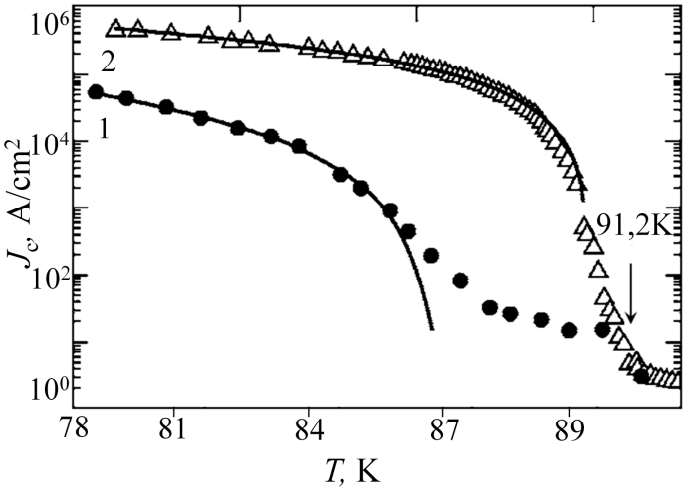
3.2.4. Kritinės elektros srovės tankio priklausomybės nuo temperatūros tyrimas

Abrikosovo magnetinių sūkurių koherentinis judėjimas priklauso nuo elektros srovės stiprio, tekančio dariniais su silpnojo superlaidumo sritimis, t. y. nuo jo kuriamos Lorenco jėgos.

3.15 paveiksle pateikta kritinės elektros srovės tankio priklausomybė nuo temperatūros gauta iš eksperimentinių duomenų naudojantis 10 μV elektrinės įtampos kriterijumi. Palyginus superlaidžiuose dariniuose be (2 kreivė) ir su (1 kreivė) kanalu kritinės elektros srovės stiprio tankio priklausomybes nuo temperatūros matosi silpnosios superlaidumo srities indėlis į darinį. 1 – osios kreivės atveju, kai superlaidžiame darinyje suformuota silpnojo superlaidumo sritis, kritinis elektros srovės tankis yra mažesnis palyginus su dariniu be kanalo (2 kreivė). Palyginimui, darinyje be silpnojo superlaidumo srities 78 K temperatūroje kritinis elektros srovės tankis apie 100 kartų didesnis.

Tačiau svarbus temperatūrų intervalas 86,7–89 K, nes šiame temperatūrų intervale elektros varžos prilausomybėje nuo temperatūros stebimas antrasis fazinis virsmas, voltamperines charakteristikas sudaro elektrinės įtampos

laipteliai. Šiame temperatūrų intrevale krininis elektros srovės tankis yra net 1000 ir daugiau kartų mažesnis.



3.15 pav. Kritinės elektros srovės tankio priklausomybė nuo temperatūros logaritminiame mastelyje superlaidžiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniuose: 1 kreivė atitinka darinį su kanalu, 2 – darinį be kanalo

Fig. 3.15. The critical electric current density dependence on temperature in the logarithmic scale of the superconductive $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ layers: the first curve corresponds to the structure with a channel, the second curve corresponds to the structure without a channel

Iš kritinės elektros srovės stiprio tankio priklausomybės nustatoma, kad superlaidžiame darinyje su magnetinių sūkurių kanalu kritinė medžiagos temperatūra yra žemesnė (ištisinė linija 1 kreivės atveju) nei darinyje be kanalo. Ištisinė linija gauta eksperimentinius taškus sutapatinama su lygtimi

$$J_c \propto J_c(0)(1-T/T_c)^n, \tag{3.11}$$

čia n – parametras, kuriuo aprašomas prieraišos mechanizmas, $J_c(0)$ – kritinės srovės tankis temparatūrai arėjant į 0 K. Geriausias J_c sutapatinimo rezultatas superlaidiems YBCO dariniams tiek be ir su silpnojo superlaidumo sritimis, kai $J_c(0) = (10{,}2\pm0{,}1)\times10^6$A/cm^2 ir esant skirtingoms n ir T_c vertėms. Superlaidžiam dariniui be silpnojo superlaidumo srities $T_c = (90{,}1\pm0{,}1)$ K ir $n = 1{,}43$, tuo tarpu dariniui su silpnojo superlaidumo sritimi $T_c = (86{,}2\pm0{,}1)$ K ir $n = 2{,}20$. Kritinė temperatūra $T_c = 90{,}1$ K ir $T_c = 86{,}2$ K iš kritinės srovės tankio priklausomybės nuo tempartūros paklaidų ribose sutampa su kritine temperatūra randama iš elektrinės varžos priklausomybių nuo temperatūros. Prieraišos mechanizmo

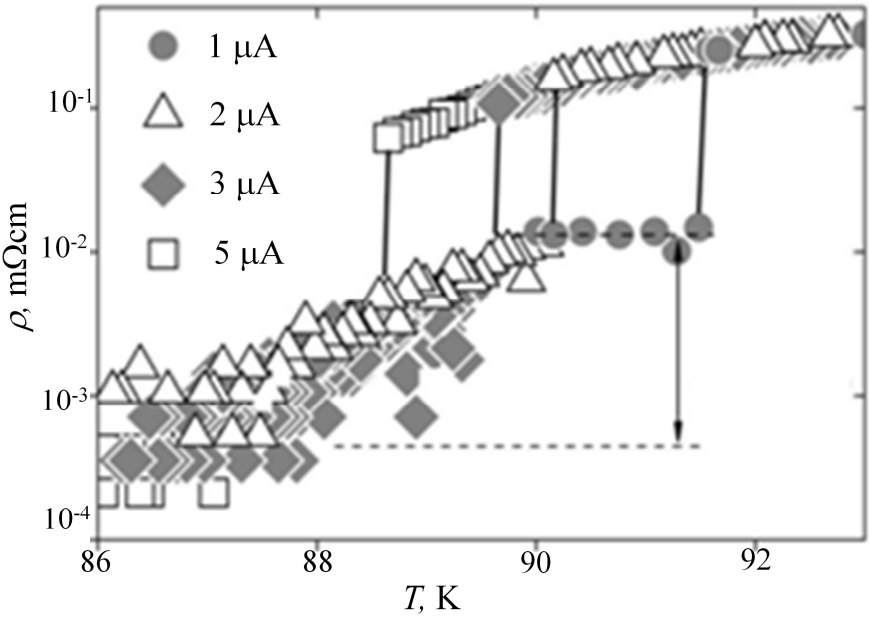
parametras *n* didesnis superlaidaus darinio su silpnojo superlaidumo sritimi. Tai rodo, jog prieraišos mechanizmai skirtigi ir silnojo superlaidumo atveju prieraišos mechanizmas stipresnis.

Prieraišos mechanizmą superlaidžiuose dariniuose kuria sluoksnio augimo metu atsiradusios sraigtinės dislokacijos ir kristalitų sąaugos bei lazerio spinduliuotės sukurtos deguonies vakancijos. Aukštesnėse temperatūrose 86,7–89 K deguonies vakansijos veikia kaip pavieniai prieraišos centrai, nes koherentiškumo ilgis 1,4 karto ilgesnis, todėl Abrikosovo magnetinių sūkurių skersmuo yra 2,8 karto ilgesnis ir 1,3 karto silpnesnė prieraišos jėga. Tai lemia deguonies kiekis kristalinėje gardelėje, kuris superlaidžiame YBCO darinyje su magnetinių sūkurių kanalu yra mažesnis dėl lazerio spinduliuotės poveikio medžiagai. Iš 1 kreivės matome, kad kritinės elektros srovės stiprio tankis pradeda sparčiau stiprėti pasiekus 86,7 K temperatūrą. Palyginus eksperimentinius duomenis su kitų mokslininkų darbais (Jorgensen *et al.* 1990) iš deguonies kiekio priklausomybės nuo temperatūros kristalinėje gardelėje matosi, kad superlaidaus darinio, kurio kritinė temperatūra 86,7 K ir kritinis elektros srovės tankis kinta 1 kreivėje, deguonies kiekis yra 6,8–6,7 intervale. Mažesnis deguonies skaičius kristalinėje gardelėje reiškia didesnį deguonies vakansijų skaičių ir stipresnę prieraišos jėgą palyginus su superlaidžiuoju dariniu be kanalo.

3.2.5. Savitosios elektrinės varžos priklausomybės nuo elektros srovės stiprio tyrimas

Tiriant superlaidžiuosius YBCO darinius su silpnojo superlaidumo sritimis išmatuotos savitosios elektrinės varžos priklausomybės nuo temperatūros, keičiant elektros srovės stiprį nuo 1 μA iki 5μA. Šios priklausomybės pateiktos 3.16 paveiksle.

Tekant 1 μA elektros srovės stipriui fazinis virsmas prasideda, kai kritinė temperatūra 91,2 K, t. y. savitoji elektrinė varža labai staigiai pradeda mažėti: darinio temperatūra pakinta tik 0,1 K, savitoji elektrinė varža sumažėja 10 kartų. Tuomet savitosios elektrinės varžos mažėjimas sulėtėja: darinio temperatūrai pakitus net 2,5 K, savitoji elektrinė varža sumažėja tik 10 kartų. Pasiekusi 86,7 K temperatūrą savitoji elektrinė varža tampa lygi 0. Padidinus elektros srovės stiprį iki 2 μA, 3 μA, 5 μA, tekantį superlaidžiuoju dariniu, gaunama ta pati kitimo tendencija, tik kiekvieną kartą fazinis virsmas prasideda vis žemesnėje temperatūroje.Tekant dariniu stipresnei elektros srovei, kuriama stipresnė Lorenco jėga ir Abrikosovo magnetiniai sūkuriai ir antisūkuriai pradeda judėti koherentiškai žemesnėje temperatūroje.



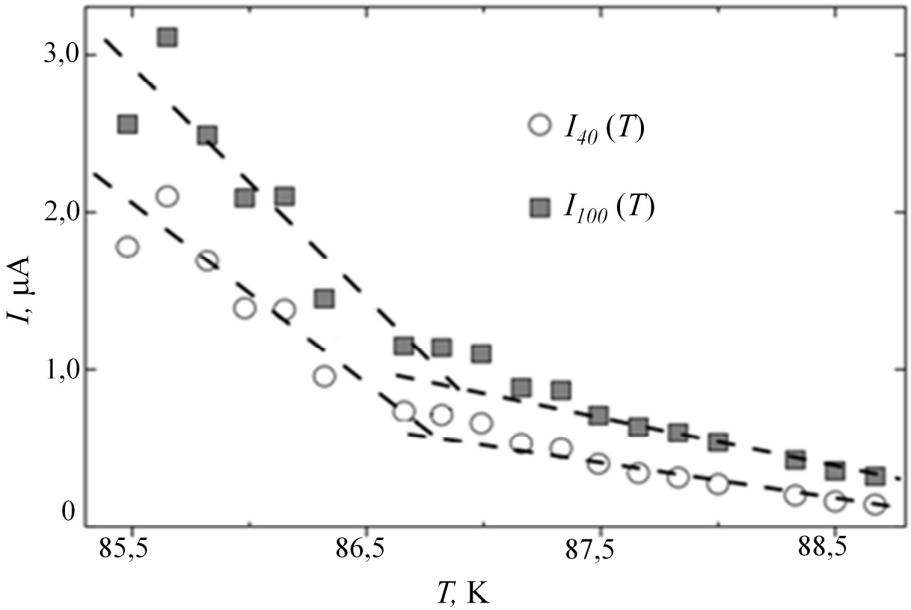
3.16 pav. Superlaidaus $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinio su Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalu savitosios elektrinės varžos priklausomybė nuo temperatūros logaritminiame mastelyje, keičiant dariniu tekančios elektros srovės stiprį

Fig. 3.16. Specific electrical resistance dependence on temperature in the logarithmic scale of superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ with channel of Abrikosov magnetic vortices, when the flowing electric current strength is changing

Tačiau Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimas sustoja esant 86,7 K temperatūrai, nes prieraišos jėga yra tokia didelė, kad Lorenco jėga jos nenugali.

3.2.6. Elektros srovės stiprio, kuriančio fiksuotą Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičių, priklausomybė nuo temperatūros

Iš eksperimentinių voltamperinių charakteristikų suskaičiuotos elektros srovės stiprio, kuriančio fiksuotą Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičių, priklausomybės nuo temperatūros. 3.17 paveiksle pateiktos šios priklausomybės 40 ir 100 Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų atveju.



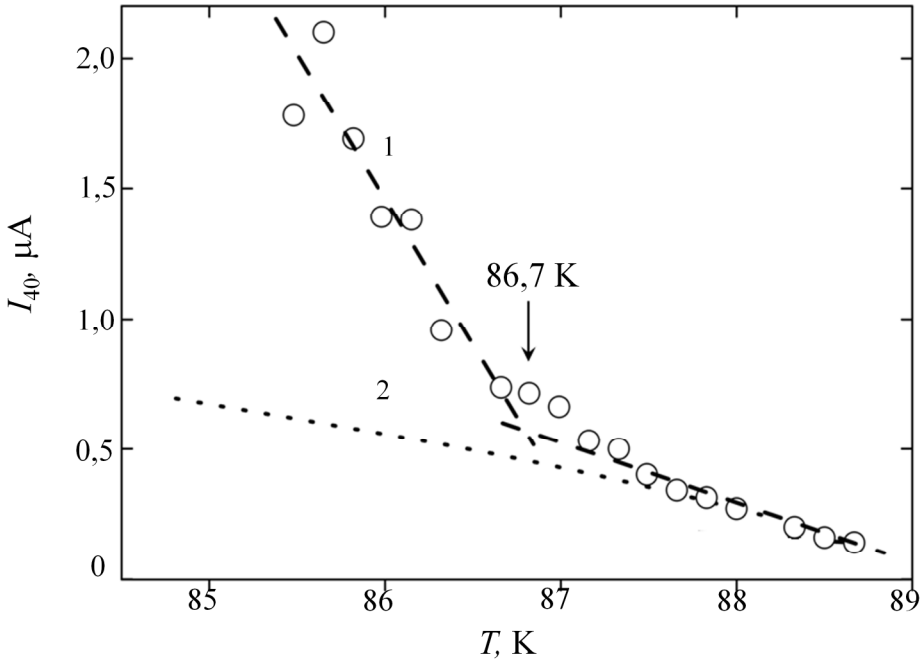
3.17 pav. Elektros srovės stiprio, kuriančio fiksuotą Abrikosovo sūkurių ir antisūkurių skaičių, priklausomybė nuo temperatūros. $I_{40}(T)$, $I_{100}(T)$ – elektros srovės stipris sukuriantis atitinkamai 40 ir 100 Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų
Fig. 3.17. Current, which self-magnetic field creates 40 and 100 vortex/antivortex pairs versus temperature. I_{40} (T), I_{100} (T) – the electric current establishing 40 and 100 pairs of Abrikosov magnetic vortices accordingly

Lazerio spinduliuote sukurtos papildomos deguonies vakansijos YBCO superlaidininke, lokalizuotos greta sraigtinių dislokacijų, sumažina pastarųjų kuriamą sūkurių prieraišos jėgą. Kuo skirtumas tarp deguonies vakansijų ir sraigtinių dislokacijų kuriamos sūkurių prieraišos jėgos mažesnis, tuo silpnesnė prieraišos jėga tampa silpnojo superlaidumo srityje, besipriešinanti Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimui. Aukštesnių temperatūrų intervale, skirtumas tarp abiejų rūšių defektais kuriamos sūkurių prieraišos jėgos 5 kartus mažesnis, nes koherentiškumo ilgis yra sumažėja 1,4 karto.

Skirtingas elektros srovės tankis silpnojo superlaidumo srityje sukuria nevienodą Abrikosovo magnetinių sūkurių tankio pasiskirstymą, o taip pat ir nevienodą greitį išilgai skirtingų kanalo dalių.

Elektros srovės stiprio, kuriančio fiksuotą Abrikosovo sūkurių ir antisūkurių porų skaičių, priklausomybę nuo temperatūros taip pat suskaičiavome iš teorinės kondensacijos energijos priklausomybės nuo temperatūros. 3.18 paveiksle pateikiame 40 Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičiui

sukurti reikalingo elektros srovės stiprio priklausomybes nuo temperatūros, kuri apskaičiuota iš eksperimentinių voltamperinių charakteristikų ir teorinės kondensacijos energijos priklausomybės nuo temperatūros.



3.18 pav. Elektros srovės stiprio I_{40}, kuriančio 40 Abrikosovo magnetinių sūkurių/antisūkurių porų, priklausomybės nuo temperatūros: 1 kreivė gauta iš eksperimentinių U(I) duomenų, 2 – iš kondensacijos energijos priklausomybės nuo temperatūros

Fig. 3.18. The current I_{40}, whose self-magnetic field creates 40 pairs of magnetic vortices/antivortices pairs versus temperature: (1) extracted from experimental I –V dependences, (2) estimated using vortex condensation energy versus temperature

Lyginant šias priklausomybes matosi, kad aukštesnėse temperatūrose 86,7–89 K abi kreivės sutampa. Tačiau žemesnėse temperatūrose 86,7–85,5 K pastebimas nesutapimas, kuris prasideda 86,7 K temperatūroje. Atsižvelgdami į aukščiau pateiktus samprotavimus dėl prieraišos jėgos dydžio, šį nesutapimą galima paaiškinti tuo, kad kondensacijos energija nepriklauso nuo superlaidininko koherentiškumo ilgio.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

Disertacijoje tiriami superlaidžiame $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksnyje suformuoti dariniai naudojant Ar jonų 532 nm bangos ilgio 2,0–2,3 W galios nuolatinės veikos lazerio spinduliuotę. Dariniuose tuo pačiu lazeriu 0,1–0,3 W galios spinduliuote formuojamos silpnojo superlaidumo sritys – Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimo kanalai. Iš eksperimentinių voltamperinių charakteristikų, išmatuotų superlaidžiuose YBCO dariniuose, turinčiuoe suformuotus kanalus, įvertintas Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius. Teoriškai suskaičiuota Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių kondensacijos energija.

1. Lazerio spinduliuote suformuotuose superlaidžiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sluoksniuose darinių silpnojo superlaidumo sritys yra mažesnių kritinių parametrų nei nemodifikuotose vietose.
2. Superlaidžiame $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinyje lazerio spinduliuote suformuotos silpnojo superlaidumo sritys yra Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimo kanalai.
3. Elektrinės varžos priklausomybėse nuo temperatūros, išmatuotose lazeriu suformuotuose dariniuose su Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo kanalais, stebimas dvigubas fazinis virsmas – aukštatemperatūris T = 86,7 K ir žematemperatūris T = 86,7 K. Dariniuose be Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalo stebimas tik aukštatemperatūrinis fazinis virsmas T = 91,2 K temperatūroje. Elektrinės varžos dydį fazinio virsmo metu lemia Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių judėjimas kanale.
4. Voltamperinėse charakteristikose išmatuotose superlaidžiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniuose, dėl Abrikosovo magnetinių sūkurių judėjimo silpnojo superlaidumo sritimis stebimas elektrinės įtampos laiptelių atsiradimas.
5. Į suformuotas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių silpnojo superlaidumo sritis elektros srovės, tekančios dariniu, kuriamas ar išorinis magnetinis laukas skverbiasi Abrikosovo magnetiniais sūkuriais, kurių skaičius atvirkščiai proporcingas kondensacijos energijai.
6. Voltamperinėse charakteristikose, išmatuotose superlaidžiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniuose su suformuotais Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalais, stebimų elektrinės įtampos laiptelių aukštis U_h nepriklauso nuo temperatūros ir elektros srovės stiprio, tekančio dariniu.

7. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius priklauso nuo elektros srovės stiprio, tekančio superlaidžiuoju YBCO dariniu su sūkurių kanalu. Elektros srovės stipriui padidėjus 17,5 karto Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių porų skaičius padidėja 11 kartų, esant fiksuotai darinio temperatūrai. Lazeriu suformavus superlaidžiuosius YBCO darinius su Abrikosovo magnetinių sūkurių kanalais sukuriama prieraišos jėga, kurios dydį lemia skirtumas tarp skirtingų prieraišos centrų, t. y. sraigtinių dislokacijų ir deguonies vakansijų, kuriamų prieraišos jėgų.
8. Abrikosovo magnetinių sūkurių ir antisūkurių greičio kitimą lemia Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičiaus didėjimas silpnojo superlaidumo srityse. Didesniam Abrikosovo magnetinių sūkurių skaičiui to paties stiprio Lorenco jėga sukuria mažesnį pagreitį.

Bendrosios išvados

1. Silpnojo superlaidumo srityse, suformuotose nuolatinės veikos 532 nm bangos ilgio Ar jonų nuolatinės veikos lazerio spinduliuote, superlaidžiuose $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dariniuose Abrikosovo magnetinių sūkurių tankis priklauso nuo darinio temperatūros ir juo tekančios elektros srovės stiprio.
2. Lazerio spinduliuote formuojant $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ darinių silpnojo superlaidumo sritis, dariniuose sukuriamos deguonies vakansijos. Deguonies vakansijos superlaidininke žemoje temperatūroje T = 86,7 K tampa išplėstiniais struktūriniais defektais. Šių defektų kuriama Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos jėga, žemesnėje nei 86,7 K temperatūroje gali konkuruoti su kitų defektų (tokių kaip tarpgrūdinės sritys, sraigtinės dislokacijos) kuriama ypač stipria prieraišos jėga. Keičiant superlaidžiojo darinio su silpnojo superlaidumo sritimis temperatūrą galima valdyti Abrikosovo magnetinių sūkurių prieraišos jėgą bei jų judėjimą.
3. Silpnojo superlaidumo sritimis Abrikosovo magnetiniai sūkuriai gali judėti koherentiškai. Toks judėjimas atsiranda tuomet, kai sūkurio ir antisūkurio užgimimo darinio kraštuose laikas sutampa su suma sūkurio ir antisūkurio lėkio iki anihiliacijos linijos laiko ir

anihiliacijos laiko. Elektros srovės stipriui didėjant, sūkurio judėjimo greičio kitimo indėlį į elektrinės įtampos laiptelio superlaidžiojo darinio voltamperinėje charakteristikoje formą lemia sūkurių magnetinės gardelės inertiškumo didėjimas didėjant sūkurių skaičiui.

Literatūra ir šaltiniai

Abrikosov, A. A. 1957. Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group, *Sov. Phys. JETP* 5: 1174.

Abrutis, A.; Kubilius, V.; Teiserskis, A.; Bigelyte, V.; Galindo, V.; Weiss, F.; Senateur, J. P.; Vengalis, B.; Jukna, A.; Butkute. R. 1997. Epitaxial YBCO layers with 45° in-plane orientation grown on MgO by Injection CVD, *Thin Solid Films* 311: 251–258.

Abrutis, A.; Sénateur, J. P.; Weiss, F.; Kubilius, V.; Bigelytė, V.; Šaltytė, Z.; Vengalis, B.; Jukna, A. 1997. Thin YBCO films on NdGaO3 (001) substrates grown by injection MOCVD, *Supercond. Sci. Technol*. 10: 959.

Albrecht, J. 2003. Temperature-Dependent Pinning of Vortices in Low-Angle Grain Boundaries in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, *Physical Review B* 68(5): 1–6.

Alcacer, L. 1989. Coordination and materials properties, *Pure and Applied Chemistry* 61(5): 933–935.

Aleksashin, B. A.; Voronin, V. P.; Verkhovskii, S. V.; Goshchitskii, B. N.; Davydov, S. A.; Zhdanov, Yu. I.; Kar'kin, A. E.; Kozhevnikov, V. L; Mirmel'shtein, A. V.; Mikhalev, K. N.; Sadovskii, M. V.; Serikov, V. V.; Cheshnitskii, S. M. 1989. Localization effects in atomically disordered high-temperature superconductors, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 95: 678–697.

Alexandrov, A. S.; Edwards, P. P. 2000. High-T_C cuprates: a new electronic state of matter?, *Physica C* 331: 97–112.

Anderson, P. W.; Kim, Y. B. 1964. Hard Superconductivity: Theory of the motion of Abrikosov Flux lines, *Review of Modern Physics* 36(1): 39–43.

Athar, M.; Das Amar, J. 2012. Superconductivity in Organic Materials: A Fascinating Phenomenon, *Research Journal of Chemical Sciences* 2(11): 67–70.

Bardeen, J.; Cooper, L. N.; Schrieffer, J. R. 1957. Theory of superconductivity, *Physical Review B* 108 (1175): 162–164.

Basov, D. N.; Liang, R.; Bonn, D. A.; Bonn, W. A.; Hardy, W. N.; Dabrowkski, B.; Quijada, M.; Tanner, D. B.; Rice, J. P.; Ginsberg, D. M.; Timusk. T. 1995. In-Plane Anisotropy of the Penetration Depth in$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ and $YBa_2Cu_4O_8$, *Superconductors Phys. Rev. Lett.* 74: 598–601.

Bates, F. E. 1986. Normal modes of tetragonal $YBa_2Cu_30_6$ and orthorhombic $YBa_2Cu_30_7$, *PHYSICAL REVIEW B* 39(1): 322–327.

Bednorz, J. G. Muller, K. A. 1986. Possible Hight T_C Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System, *Z. Phys. B – Condensed matter* 64: 189–193.

Bernstein, P.; Hamet, J. F. 2004. Vortex motion in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ twinned single crystals and epitaxial films, *Journal of Applied Physics* 95(5): 2569–2576.

Bishop, D. J.; Gammel, P. L.; Huse, D. A. 1993. Resistance in high-temperature superconductors, *Scientific American* 268(2): 48–55. ISSN 0036-8733.

Blamire, M. G. 1987. Flux Vortex Dynamics and Electric Fields in Matched Pinning Systems, *Journal of Low Temperature Physics* 68 (5–6): 335–352.

Bukauskas, V. 2010. Applications of scanning probe microscopy for development and investigation of gas sensitive nanosystems and hybrid structures integrated with the ultra-thin metal oxide films, *Ph.D. thesis (Semiconductor Physics Institute of Centre for Physical Sciences and Technology)*.

Buzea, C.; Yamachita, T. 2001. New phenomelogical derivation of temperature dependence of the coherence lenght and critical field for anisotroic three-dimensional lattices, *Physica C* 362: 210–214.

Cava, R. J.; Batlogg, B.; Chen, C. H.; Reitman, E. A.; Zahurak, S. M.; Weder, D. 1987. Single-phase 60-K Bulk Superconductor in Annealed $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(0,3<\delta<0,4)$ with Correlated Oxygen Vacancies in the Cu-O Chains, *Physical Review B* 36(10): 5719–5722.

Cooper, L. N. 1956. Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas, *Phys. Rev*. 104: 1189–1190.

Crabtree, G. W.; Nelson, D. R. 1997. Vortex physics in hight temperature superconductors, *Physics Today* 50(4):38–45.

Chaparala, M.; Chung, O. H.; Ren, Z. F.; White, M.; Coppens, P.; Wang, J. H.; Hope, A. P.; Naughton, M. J. 1996. Vortex-state resistance near parallel orientation in layered superconductors, *Physical Review B* 53(9): 5818–5825.

D'Anna, G.; Gammel, P. L; Safar, H.; Alers, G. B.; Bishop, D. J.; Giapintzakis, J.; Ginsberg, D. M. 1991. Vortex-motion-induced voltage noise in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, *Physical Review Letters* 75: 3521–3534.

Delin, K. A.; Kleinsasser, A. W. 1996. Stationary properties of high-critical-temperature proximity effect Josephson junctions, *Supercond. Sci. Technol.* 9: 227–269.

Dew-Hughes, D. 2001. The critical current of superconductors: an historical review, *Low Temperature Physics* 27(9–10):713–722.

Drung, D.; Aßmann, C.; Beyer, J.; Kirste, A.; Peters, M.; Ruede, F.; Schurig, Th. 2007. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors, *Paper 5EB01 at ASC2006, to appear in IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17: 1–6.

Durrell, J. H.; Rutter,N. A. 2009. Topical review: Importance of Low-Angle Grain Boundaries in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coated Conductors, *Superconductor Science and Technology* 22: 1–18.

Fetter, A. L.; Hohenberg, P. C.; Pincus, P. 1966. Stability of a Lattice of Superfluid Vortices, *Physical Review* 147 (1): 140–152.

Golosovsky, M.; Tsindlekht, M.; Davidov, D. 1996. High-frequency vortex dynamics in $YBa_2Cu_3O_7$, *Superconductor Science and Technology* 9: 1–15.

Halperijn, B. I.; Nelson, D. R. 1979. Resistive Transition in Superconducting Films, *Journal of Low Temperature Physics* 36 (5–6): 599–616.

Harshman, D. R.; Kossler, W. J.; Wan, X.; Fiory, A. T.; Greer, A. J.; Noakes, D. R.; Stronach, C. E.; Koster, E.; Dow, J. D. 2004. Nodeless pairing state in single-crystal $YBa_2Cu_3O_7$, *Phys. Rev. B* 69: 174505.

Hawley, M.; Raistrick, I. D.; Beery, J. G.; Houlton, R. H. 1991. Growth Mechanism of Sputtered Films of $YBa_2Cu_3O_7$ Studied by Scanning Tunneling Microscopy, *Science* 251 (5001): 1587–1589.

Huijbregtse, J. M.; Klaassen, F. C.; Szepielow, A.; Rector, J. H.; Dam, B.; Griessen, R.; Kooi, B. J.; de Hosson; J. Th. M. 2002. Vortex pinning by natural defects in thin films of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, *Superconductor Science and Technology* 15: 395–404.

Hull, J. R.; Mulcahy, T. M.; Uherka, K. L.; Abboud, R. G. 1995. Low rotational drag in high-temperature superconducting bearings, *IEEE Tram. Appl. Superconduct* 5: 626–629.

Jorgensen, J. D.; Veal, B. W.; Paulikas, A. P.; Nowicki, L. J.; Crabtree, G. W.; Claus, H.; Kwok, W. K. 1990. Structural properties of oxygen-deficient $YBa_2Cu_3O_7$, *Physical Review B* 41(4): 1863–1877.

Josephson, B. D. 1974. The Discovery of Tunneling Supercurrents, *Science* 184(4136): 527.

Jukna, A.; Abrutis, A. 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 Temp. Phys.* 117(5–6): 1555–1559.

Jukna, A.; Barboy, G.; Jung, G.; Abrutis, A.; Wang, X.; Li, D.; Sobolewski, R. 2008. Easy Vortex Motion in an Artificial Channel of of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Superconducting Films, *Acta Physica Polonica A* 113(3): 959–962.

Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Abrutis, A.; Wang, X.; Li, D.; Sobolewski, R. 2006. Electric transport properties of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin-film bridges with laser-written channels of easy vortex motion, *Journal of Applied Physics* 99: 113902–113906.

Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Banerjee, S. S.; Myasoedov, Y.; Plaušinaitiene, 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.

Jukna, A.; Sobolewski, R. 2003. Time-resolved photoresponse in the resistive flux-flow state in Y-Ba-Cu-O supercondcting microbridges, *Supercond. Sci. Technol.*16: 911–915.

Jung, G.; Lewandowski S. J., Shapiro B. Ya., Yuzhelevski, Y. 2000. Josephson-like effects in coherent motion of vortces in a periodic potential, *Physica C* 332: 51–57.

Kalisky B.; Kirtely J. R.; Nowadnick E. A.; Dinner R. B.; Zeldov E.; Ariando, W. S.; Hilgenkamp, H.; Feldmann, D. M.; Moler, K. A. 2009. Dynamics of single vortices in grain boundaries: I-V characteristics on the femtovolt scale, *Applied Physics Letters* 94: 202504.

Klaassen, F. C.; Doornbos, G.; Huijbregtse, J. M.; van der Geest, R. C. F.; Dam, B.; Griessen, R. 2001. Vortex pinning by natural linear defects in thin films of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, *Physical Review B* 64: 184523–184543.

Koblischka, M. R., Murakami, M. 2000. Pinning mechanisms in bulk high-T_C superconductors, *Supercond. Sci. Technol.* 13: 738–744.

Kopelevich, Y.; Esquinazi, P. 2000. Vortex Lattice Depinning vs. Vortex Lattice Melting: a pinning-based explanation of the equilibrium magnetization jump, *Solid State Communications* 114(5): 241–244.

Kuriki, S.; Hirano, S.; Maeda, A.; Kiss, T. 2000. Vortices in High-Tc Superconductors, *Topics in Applied Physics* 91: 5–52.

Lapinskas, S.; Rosengren, A.; Tornau, E. E. 1993. Monte Carlo study of oxygen thermal desorption from YBCO Compound, *Surface Sciene* 287–288(1):50–55.

Larsson, R.; Nilsson, B.; Ivanov, Z. G. 2000. Fabrication and transport measurements of YBCO nanostructures, *J. Vac. Sci. Technol. B* 18: 25–31.

Lebedev, O. I.; Hamet, J. F.; VanTendeloo, G.; Beaumont, V.; Raveau, B. 2001. Structure and properties of the $YBa_2Cu_3O_{7-x}/LaAlO_3$ superlattices, *Journal Of Applied Physics* 90(10): 5261–5267.

Liu, L.; Dond, Ch.; Zhang, J.; Chen, H.; Chen, L. 2002. A simple volumetric method for oxygen content determination in high-T_c doped YBCO composiotions, *Physica C* 383: 17–22.

Luis De Los Santos, V.; Bustamante, A. D.; Gonzalez, J. C.; Feijoo, J. L.; Osorio, A.; Mitrelias, T.; Majima, Y.; Crispin, H.; Barnes, W. 2010. Magnetic Properties of the Superconductor $LaCaBaCu_3O_7$, *The Open Superconductors Journal* 2: 19–27.

Lykov, A. A. 1992. The mixed state in superconductors, *Soviet Phyics Uspekhi* 35: 811–841.

Martı´n, J. I.; Vélez, M.; Nogués, J.; Schuller, I. K. 1997. Flux Pinning in a Superconductor by an Array of Submicrometer Magnetic Dots, *Physical Review Letters* 79(10): 1929–1932.

Martienssen, W.; Varlimont, H. 2005. *Springer Handbook of Condensed Matter and Materials*. 1200. ISBN 3-540-44376-2.

Meissner, W. H. 1960. Superconductivity Of Contacts With Interposed Barriers, *Physical Review* 17(3): 672–680.

Meissner, W. H.; Ochsenfeld, R. 1933. Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit, *Naturwissenschaften* 21: 787–788.

Mikitik, G. P.; Brandt, E. H. 2009. Flux-Line Pinning by Point Defects in Anisotropic biaxial type-II Superconductors, *Physical Review B* 79: 020506–020510.

Modanesse, G. 2003. Local contribution of a Quantum kondensate to the vacuum energy density, *Mod.Phys.Lett*. A18: 683-690.

Morrison, D. D.; Rose, R. M. 1970. Controlled pinning in superconducting foils by surface microgrooves, *Physical Review Letters* 25: 356–359.

Mühlbauer, S.; Pfleiderer, C.; Böni, P.; Forgan, E. M.; Fort, D.; Keiderling, U.; Behr, G. 2009. Morphology of the Superconducting Vortex Lattice in Ultrapure Niobium, *Physical Review Letters* 102 (13): 136408–136412.

Muroi, M.; Street, R. 1995. Charge transfer, phase separation and percolative superconductivity in $YBa_2Cu_3O_{6+y}$, *Physica C* 246: 357–374.

Nawaz, S.; Bauch, T.; Lombardi, F. 2011. Transport Properties of YBCO Nanowires, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity* 21(3): 164–167.

Nguyen, P. P.; Wang, Z. H.; Rao, A. M.; Dresselhaus, M. S.; Moodera, J. S.; Dresselhous, 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.

Ohshima, S.; Tanabe, K.; Morishita, T.; Tonouchi, M. 2003. Observation of Vortices, *Topics in Applied Physics* 91: 53–102.

Onnes, H. K. 1913. Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium, *Nobel Lecture*.

Palstra, T. T. M.; Batlogg, B.; van Dover, R. B.; Schneemeyer, L. F.; Waszczak, J. V. 1990. Dissipative Flux Motion In High Temperature Supercondocturs, *Physical Review B* 41(10): 6621–6632.

Pedyash, M. V.; Gerritsma, G. J.; Blank, D. H. A.; Rogalla, H. 1995. Coherent Vortex Motion in Superconducting Nanobridges Based on YBaCuO Thin Films, *IEEE Transactions on Electron Devices* 5(2): 1387–1390.

Reichhardt, C.; Olson, C. J.; Nori, F. 1997. Dynamic Phases of Vortices in Superconductors with Periodic Pinning, *Physical Review Letters* 78(13): 2648–2651.

Reichhardt, Ch.; Grønbech-Jensen, N. 2001. Critical currents and vortex states at fractional matching fields in superconductors with periodic pinning, *Physical Review B* 63: 054510–054520.

Repaci, J. M.; Kwon, C.; Li, Q.; Jiang, X.; Venkatessan, T.; Glover, R. E.; Lobb, C. J.; Newrock, R. S. 1996. Absence of a Kosterlitz–Thouless Transition in Ultrathin $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Films, *Physical Review B* 54 (14): R9674–R9677.

Salomons, E.; de Fontaine, D. 1990. Monte Carlo study of trancer and chemical diffusion of oxygen in $YBa_2Cu_3O_{6+2c}$, *Physical Review B* 41(16): 11159–11167.

Siegel, R. W. 1978. Vacancy concentrations in metals, *Journal of Nuclear Materials* 69–70: 117–146.

Sun, H. B.; Russel, G. J.; Taylor, K. N. R. 1995. Systematic study of pinning energy for oxygen-deficient YBCO, *Physica C* 241: 219–227.

Tinkham, M. 1975 Introduction to Superconductivity, *International series in Pure and Applied Physics*.

Troyanovski, M.; Aarts, J.; Kes, P. H. 1999. Collective and plastic vortex motion in superconductors at high flux densities, *Nature* 399: 665–668.

van Dalen, A. J. J.; Griessen, R.; Libbrecht, S.; Bruynseraede, Y.; Osquiguil, E. 1996. Quantum creep and pinning properties of oxygen-deficient $YBa_2Cu_3O_{xn}$ films, *Physical Review B* 54(2): 1366–1381.

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: 024523–024533.

Wimbush, S. C.; Durrell, J. H.; Bali, R.; Yu, R.; Wang, H.; Harrington, S. A.; MacManus-Driscoll, J. L. 2009. Practical Magnetic Pinning in YBCO, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19(3): 3148–3151.

Wördenweber, R. 1999. Mechanisms of vortex motion in high-temperature superconductors, *Reports on Progress in Physics* 62: 187–236.

Wu, M. K.; Ashburn, J. R.; Torng, C. J.; Hor, P. H.; Meng, R. L.; Gao, L.; Huang, Z. J.; Wang, Y. Q.; Chu, C. W. 1987. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-0 Compound System at Ambient Pressure, *Physical Review Letters* 58(9): 908–910.

Yuzhelevski, Y.; Jung, G. 1999. Artificial reversible and programmable magnetic pinning for high-T superconducting thin films, *Physica C* 314: 163–171.

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.

Zelezny, V.; Tanner, D. B.; Kamarfis, K.; Kozeeva, L. P.; Pavlyuk, A. A. 1995. Anisotropic optical properties of single-crystal $GdBa_2Cu_30_{7-a}$, *Z. Phys. B* 96: 313–318.

Zhang, Y.; Tavrin, Y.; Krause, H. J.; Bousack, H.; Braginski, A. I.; Kalberkamp, U.; Matzander, U.; Burghoff, M.; Trahms, L. 1995. Applications of High-Temperature SQUIDS, *Applied Superconductivity* 3: 367–381.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Jukna, A.; Steponavičienė, L.; Plaušinaitienė, V.; Abrutis, A.; Maneikis, A.; Šliužienė, K.; Lisauskas, V.; Sobolewski, R. 2013. Coherent magnetic vortex motion in optically-formed channels for easy flow in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting thin films. *Applied Physics B*, doi: 10.1007/s00340-013-5484-4 (published on line on June 2, 2013 http://link.springer.com/article/10.1007/s00340-013-5484-4) ISSN 1432-0649 (Online) (ISI Web of Science) (priimtas spausdinti).

Steponavičienė, L.; Šulcas, J.; Jukna, A.; Jung, G.; Plaušinaitienė, V.; Abrutis, A.; Maneikis, A.; Gong, M.; Sobolewski, R. 2011. Investigation of vortex density in laser-written Π-Shaped channel of YBCO bridge by means of *I-V* dependences. *Acta Physica Polonica A*, 119(2): 180–182. ISSN 0587-4246 (ISI Web of Science).

Steponavičienė, L.; Šulcas, J.; Jukna, A.; Plaušinaitienė, V.; Abrutis, A.; Gong, M.; Sobolewski, R. 2011. Investigation of density and velocity of Abrikosov vortices in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting thin films with a laser-written channel for easy vortex motion. *Materials science* (Medžiagotyra), 17(2): 180–185. ISSN 1392-1320 (ISI Web of Science).

Steponavičienė, L.; Šulcas, J.; Jukna, A.; Barboy, I.; Jung, G.; Abrutis, A.; Sobolewski, R. 2009. Current-voltage dependences of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting thin films with laser-written channel of easy vortex motion. *Materials science* (Medžiagotyra) 15(4): 291–295. ISSN 1392-1320 (ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Steponavičienė, L.; Jukna, A. 2011. Magnetinių sūkurių koherentinio judėjimo $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superlaidžiuosiuose plonuosiuose sluoksniuose, su lazeriu įrašytu Π-formos sūkurių kanalu, tyrimai, sluoksniais tekant srovei $I \sim I$c: *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 3(6): 105-110. ISSN 2029-2341 print / ISSN 2029-2252 online.

Lina STEPONAVIČIENĖ

MAGNETINIŲ SŪKURIŲ JUDĖJIMO $YBA_2CU_3O_{7-X}$ SUPERLAIDŽIŲ SLUOKSNIŲ KANALAIS TYRIMAS IR VALDYMAS

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02P), kondensuotos medžiagos: elektroninė struktūra, elektrinės, magnetinės ir optinės savybės, superlaidininkai, magnetinis rezonansas, relaksacija, spektroskopoja (P206)

INVESTIGATION AND CONTROL OF MOTION OF MAGNETIC VORTICES IN THE THIN SUPERCONDUCTING $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ FILMS

Doctoral Dissertation

Physical Sciences, Physics (02P),
Condensed Matter: Electronic Structure; Electrical, Magnetic And Optical Properties; Superconductors; Magnetic Resonance; Relaxation; Spectroscopy (P260)

2013 10 18. 7,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius