

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY  
KENGASH**

---

**AJINIYOZ NOMIDAGI NUKUS DAVLAT PEDAGOGIKA INSTITUTI**

**JALEKESHOV AZAMAT SARSENGALIYEVICH**

**BOSIM (TARANGLIK) TA’SIRIDAGI KUPRATLAR  
O‘TAO‘TKAZUVCHANLIK XOSSALARIDA POLARON SAMARASI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Farg‘ona – 2024**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по  
физико-математическим наукам**

**Contents of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on  
physical and mathematical sciences**

**Jalekeshov Azamat Sarsengaliyevich**

Bosim (taranglik) ta'siridagi kupratlar o'tao'tkazuvchanlik xossalarida  
polaron samarasi ..... 3

**Жалекешов Азамат Сарсенгалиевич**

Поляронный эффект в сверхпроводящих купратов под давлением  
(напряжением)..... 24

**Jalekeshov Azamat Sarsengaliyevich**

Polaronic effect in the superconducting properties of the cuprates under  
pressure (strain)..... 45

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 52

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY  
KENGASH**

---

**AJINIYOZ NOMIDAGI NUKUS DAVLAT PEDAGOGIKA INSTITUTI**

**JALEKESHOV AZAMAT SARSENGALIYEVICH**

**BOSIM (TARANGLIK) TA’SIRIDAGI KUPRATLAR  
O‘TAO‘TKAZUVCHANLIK XOSSALARIDA POLARON SAMARASI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi oliy attestatsiya komissiyasida № B2022.2.PhD/FM724 raqami bilan ro'yxatga olingan**

Dissertatsiya Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (резюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasi ([www.ferpi.uz](http://www.ferpi.uz)) va «Ziyonet» axborot-ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:** **Yavidov Bahram Yangibaevich**  
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

**Rasmiy opponentlar:** **Rasulov Akbarali Maxammatovich**  
fizika-matematika fanlari doktori,  
professor

**Djumanov Safarali**  
fizika-matematika fanlari doktori,  
professor

**Yetakchi tashkilot:** **Samarqand davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Farg'ona politexnika instituti huzuridagi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil \_\_\_\_\_ soat \_\_\_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 150107, Farg'ona shahar, Farg'ona ko'chasi 86-uy. Tel. (+99873) 241-12-06; факс (+99873) 241-12-06; e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru) ).

Dissertatsiya bilan Farg'ona politexnika institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_\_\_ raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 150107, Farg'ona shahar, Farg'ona ko'chasi 86-uy. Tel. (+99873) 241-12-06).

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil “ ” \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2024-yil “ ” \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_\_ raqamli reestr bayonnomasi)

**N.X. Yuldashev**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash raisi f-m.f.d., professor

**B.J. Axmadaliyev**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash ilmiy kotibi f-m.f.b.f.d (PhD)

**S.M. Otajonov**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi  
f-m.f.d., professor

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda mavjud an'anaviy energiya manbalarini takomillashtirishning yangi usullarini ishlab chiqish, energiya tejamkor va ekologik toza texnologiya asosida faoliyat yuritishga o'tish insoniyat uchun eng dolzarb muammolardan hisoblanadi. Bu borada, elektr qarshiligini yo'qotish xossasiga ega o'tao'tkazuvchan moddalarga, xususan 1986-yilda Bednorz va Muller tarafidan kashf etilgan yuqori haroratli o'tao'tkazgichlar (YuHO'O') (Bednorz J and Muller K, Z. Phy. B (CM) 64,189(1986)) turkumiga mansub birikmalarga katta umid qilinmoda. YuHO'O' mis-oksidli birikmalar (kupratlar) hisoblanadi. Tajribalar ko'rsatishicha yuqori bosim ostida kupratlar o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratini ancha oshirish mumkin. Hozirda kupratlarning Hg-1223 birikmasi 30 Gpa dan yuqori bosim ostida o'tao'tkazuvchanlik holatiga  $T_c = 164$  K o'tishi tasdiqlangan (Gao et al., Phys.Rev. B 50, 4260 (1994)). Shu bilan birga ba'zi bir tagliklarda o'stirilgan kuprat pardalari hajmiy namunalarga nisbatan yuqoriroq o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratiga ega ekanligi ham aniqlangan (Naito et al., Physica C 546, 84 (2018)). Natijada, tarkibida YuHO'O' pardalari mavjud II avlod o'tao'tkazgichli kabellar ishlab chiqarish texnologiyasi rivojlana boshlagan (A. Голя. Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников 2009. С. 432).

Dunyoning yetakchi ilmiy-tadqiqot institutlaridagi olimlar yuqori haroratli o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratini oshirish usullari haqida ilmiy izlanishlar olib bormoqda. Kuprat pardalarining o'ziga xos jihati bu parda namunasining taranglik (bosim) ta'sirida bo'lishidir. Shu sabab bosim (taranglik) ta'sirida bo'lgan kupratlar o'tao'tkazuvchanligini tadqiq etish hozirgi zamon kondensatlangan holat fizikasining dolzarb muammolaridan biri hisoblanadi. Bosim (taranglik) ta'siri ostida bo'lgan kupratlar o'tao'tkazuvchanligiga bag'ishlangan bir-nechta nazariy ishlar mavjud (Chen et al., Phys. Rev. B 61, 3691(2000), Lin et al., Physica C 341, 445 (2000)). Ammo, bu ishlarda kupratlarning asosiy jihatlari, u ham bo'lsa, kupratlarda elektron-fonon ta'sirlashish kuchli ekanligi, buning oqibatida zaryad tashuvchisi polaron tabiatga ega ekanligi va CuO<sub>2</sub> tekisligi kovaklari apikal kislorod ionlari tebranishlari bilan kuchli ta'sirlashishi inobatga olinmagan. Qolaversa, aynan bosim (taranglik) ostida bo'lgan kuprat ichidagi pardasimon ikki o'lchamli (qatlam) sohalarida xona haroratidagi o'tao'tkazuvchanlik kuzatilishi mumkinligi haqidagi bashorat (Dzhumanov et al., Func. Mat. 29, 475 (2022)) bir tomondan tadqiqot muammosining naqadar dolzarb ekanligini ko'rsatsa, boshqa tomondan mazkur tadqiqot bajarilishi zarurati mavjudligini ko'rsatadi.

Respublikamizda ham yuqori haroratli o'tao'tkazuvchan moddalarning fizik xususiyatlarini o'rganish, energiyatejamkor materiallar yaratishning istiqbolli usullarini yaratishga yo'naltirilgan keng qamrovli chora tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasida "... iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash, hayotning barcha sohalariga "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini faol

tatbiq etish, energiya samaradorligini oshirish...”<sup>1</sup> bo‘yicha aniq vazifalar belgilab qo‘yilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, mavjud an‘anaviy energiya manbalarini takomillashtirishning yangi usullarini ishlab chiqish, arzon, yuqori darajada ishonchli, ekologik toza va xavfsiz bo‘lgan muqobillarini yaratish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 16-fevraldagi PF-4958-sonli “Oliy o‘quv yurtidan keyingi ta‘lim tizimini yanada takomillashtirish to‘g‘risida”gi, 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi farmonlari, 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishidagi izlanish natijalari ma‘lum darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining II “**Energetika, energotejamkorlik va muqobil energiya manbalari**” ustuvor yo‘nalishiga mos holda olib borilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Kupratlardagi o‘tao‘tkazuvchanlik muammosini dunyoning ko‘plab olimlari tajribalar orqali va nazariy yo‘l bilan o‘rganishgan. Jumladan: chet el olimlaridan C. Chen (Xitoy), H.Q. Lin (Xitoy), Y. Jiang (Singapur), L. Chen (AQSh), S.A. Trugman (AQSh), Ming Lei (AQSh), A.R. Bishop (AQSh), L. Liu (AQSh), H. Ledbetter (AQSh), G. Calestani (Italiya), C. Rizolli (Italiya), H. Yamomota (Yaponiya), M. Naito (Yaponiya), H. Sato (Yaponiya), J. Bonča (Sloveniya), Bussmann-Holder (Germaniya), M. Zoli (Germaniya), G.L. Goodvin (Kanada), M. Berciu (Kanada), A.S. Alexandrov (Angliya), P.E. Kornilovitch (Angliya), X.J. Chen (Shvetsariya), R. Khasanov (Shvetsariya) ishlarida o‘rganilgan. Yurtimizda esa S. Djumanov, B. Yavidov, P.J. Baymatov, B. Abdullaev, B. Narimbetov, D. Gulamova, D. Djurayev, U. Kurbanov, O. Ganiev, E. Karimboev kabi olimlar kupratlardagi o‘tao‘tkazuvchanlikning turli xossalarini o‘rganish yo‘lida tadqiqotlar olib bormoqdalar.

Bugungi kungacha YuHO‘O‘ ning bir necha nazariy modellari mavjud. Ularga Ginzburgning eksiton modeli, Hubbard modeli, Holstein-Hubbard modeli, kengaytirilgan  $t$ - $J$  modeli va boshqalar. Ko‘plab tajriba ma‘lumotlarining ko‘rsatishicha YuHO‘O‘ kupratlarda boshqa ta‘sirlashishlarga qaraganda elektron-fonon o‘zaro ta‘sir kuchliroq va zaryad tashuvchilar (bi)polaronlar ekan. Bularni hisobga olgan holda, to‘plangan tajriba natijalarini polaron yondashuvi asosida nazariy tarafdin tushuntirish zarurati mavjud.

**Dissertatsiya tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** 29.10.2020-yildagi PF-6097-sonli “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash

---

<sup>1</sup>O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi “2022-2026-yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-60-son Farmoni

to'g'risida" gi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining farmoni ijrosini taminlash rejalari doirasida olib borilgan.

**Tadqiqotning maqsadi.**  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kupratlari o'tao'tkazuvchanlik kritik harorati- $T_c$  ning bir o'qli panjara tarangligi (bosimi) ga hamda legirlash darajasiga bog'liqlik qonuniyatlarini aniqlashdan iborat

**Tadqiqotning vazifalari:** Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar tanlab olindi:

kuchli elektron-fonon ta'sirlashish (EFT) tizimiga ega  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kupratlarida polaron massasining kristall parametrlariga, xususan bir o'qli taranglik va legirlash darajasiga bog'liqligini hisoblash;

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yupqa pardasida  $T_c$  ga sirtqi bir o'qli taranglik ta'sirini o'rganish;

$\text{LaSrAlO}_4$  va  $\text{SrTiO}_3$  tagliklarida o'stirilgan  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yupqa pardasi uchun  $T_c$  ning legirlash darajasiga bog'liqligini o'rganish;

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  uchun  $T_c$  ning bir o'qli bosim va bir o'qli taranglik bo'yicha hosilaviy qiymatlarini hisoblash;

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  uchun  $T_c$  ning bir o'qli taranglikga bog'liqligini o'rganish (hisoblash);

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  uchun  $T_c$  ning bir o'qli taranglik va bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlarini hisoblash.

**Tadqiqotning ob'yekti.** Kuchli o'zaro ta'sirlashuvchi elektron-fonon tizimi, polaron, bipolaron,  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kupratlari.

**Tadqiqotning predmeti.** Elektron-fonon ta'sirlashishi (EFT), zaryad tashuvchisi (polaron) ning massasi, bir o'qli taranglik ta'siri, bir o'qli bosim ta'siri, bipolaronlarning Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi (BEK), o'tao'tkazuvchanlik.

**Tadqiqotning usullari.** Qo'yilgan vazifalardan kelib chiqib, kupratlardagi polaron massasi va o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining bir o'qli taranglik va legirlash darajasiga bog'liqligini hisoblash uchun, Kengaytirilgan Holstein-Hubbard modeli, ikkilamchi kvantlash usuli, o'tao'tkazuvchanlikning bipolaron yondashuvi, hisoblashning sonli usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

har xil legirlash darajalaridagi  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kuprat namunalari o'tao'tkazuvchanlik  $T_c$  ga bir o'qli taranglik (bosim) ning ta'sirini tavsiflovchi nazariy model taklif qilindi;

birinchi marta  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yupqa pardasi va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kristall strukturasiidagi polaron massalarining bir o'qli taranglik ta'sirida o'zgarishi tushuntirildi. Xususan,  $a(c)$  -o'qi bo'ylab siqilish tarangligi ta'sirida polaron massasining kamayishi (ortishi) va cho'zilish tarangligi ta'sirida polaron massasining ortishi (kamayishi) tushuntirilgan;

birinchi marta  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yupqa pardalarining "1/8" anomaliyasini o'zida aks ettirgan o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining legirlash darajasiga bog'liqligini ifodalovchi  $T_c \sim x$  fazaviy diagrammasi olindi;

turli legirlash darajalaridagi  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  uchun o'tao'tkazuvchanlik  $T_c$  ning bir o'qli taranglik va bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlari elastiklik doimiylarning qiymatiga bog'liq ravishda o'zgarishi aniqlandi;

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kuprati o'tao'tkazuvchanlik  $T_c$  ning qiymati bir o'qli taranglik ta'sirida o'zgaradi. O'tao'tkazuvchanlik  $T_c$  ning bir o'qli taranglik hamda bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlari elastiklik doimiylarining qiymatiga bog'liq ravishda o'zgarishi aniqlandi.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yupqa pardasidagi polaron massalari bir nechta legirlash darjalari uchun aniqlangan;

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kupratidagi polaron massasining taranglikga bog'liqligi o'rganilgan;

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kuprati va  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yupqa pardasi uchun  $T_c$  qiymatlarini Holstein-Hubbard modeli doirasida tushuntirish uchun nazariy yondashuv ishlab chiqilgan;

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kupratlari uchun  $T_c$  ning bir o'qli bosim va bir o'qli taranglik bo'yicha hosilalari tushuntirilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Amalda ko'p yillar davomida sinalgan nazariy kondensatsiyalangan moddalar fizikasining zamonaviy usullaridan foydalanish, jumladan kengaytirilgan Holstein-Hubbard modelidan foydalanish, nazariy jihatdan olingan xulosalar  $T_c(T_{BEK})$  ning bir o'qli taranglik va legirlash darajasiga bog'liqligining asosiy qonuniyatlariga muvofiqligi bilan tasdiqlanadi. Shuningdek, nazariy fizikaning tasdiqlangan zamonaviy usullaridan foydalanib bajarilgan hisob-kitob natijalarining eksperimental ma'lumotlariga mos kelishidir.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, kupratlarning o'tao'tkazuvchanlikka o'tish kritik haroratining mikroskopik nazariyasini ishlab chiqishda foydali bo'ladi. Kupratlar o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining qiymati polaron massasining o'zgarishiga bog'liq ravishda o'zgaradi. Bu esa, mis-kislrod tekisligidagi mis va uning yuqorisida joylashgan kislrod orasidagi oraliq (apikal masofa) o'zgarishi bilan amalga oshadi. Bu kupratlar kristall strukturasi va strukturaga bog'liq o'zgaradigan fizik xossalari to'g'risidagi nazariy bilimlarni takomillashtirishda qo'llanilishi mumkinligi bilan belgilanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, kristall strukturani o'rganish va tashqi bir o'qli taranglik ta'sirida o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining qiymati qanday o'zgarishini o'rganish bo'yicha nazariy hisoblashlarni amalga oshirish va amaliy materialshunoslikni rivojlantirishda foydalanish mumkin.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Mazkur dissertatsiya ishining ilmiy tadqiqot natijalari asosida:

har xil legirlash darajalaridagi  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kuprat namunalari o'tao'tkazuvchanlik  $T_c$  ga bir o'qli taranglik (bosim) ning ta'sirini tavsiflovchi nazariy model doirasida, kupratlardagi polaron massalarini hisoblash va

o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining legirlash darajasiga bog'liqligini ifodalovchi  $T_c \sim x$  fazaviy diagrammasi olish ilmiy-amaliy natijalaridan O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida 2020-2024-yillarga mo'ljallangan ilmiy-tadqiqot ishlari dasturi doirasida bajarilayotgan "Legirlangan YuHO'O'-kupratlarning elektron nazariyasi va uni dielektrik/metall va o'tao'tkazuvchanlik fazalarining hosil bo'lishi va nanomasshtabda bo'linishini tadqiq qilish uchun qo'llash" mavzusidagi fundamental ilmiy-tadqiqot dasturining ilmiy natijalarini taqqoslashda foydalanilgan (O'zR FA 2023-yil 25-iyun №2/1255-1397 sonli ma'lumotnomasi). Mazkur ilmiy natijalardan foydalanish kuprat yuqori haroratli o'tao'tkazuvchanligi mikroskopik nazariyasini rivojlantirish va kuprat namunlari avtolokallashgan elektron (yoki kovak) energiyasi, avtolokallashgan elektron (yoki kovak) massasi, o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratini takomillashtirish imkonini bergan;

har xil legirlash darajalaridagi  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  va  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kuprat namunalari o'tao'tkazuvchanlik  $T_c$  ning tashqi bir o'qli taranglik ta'sirida o'zgarishini hisoblash bo'yicha ilmiy natijalardan 2021-2023-yillarda S.Seyfullin nomidagi Qozog'iston agrotexnika tadqiqot universitetida "Yuqori kritik parametrlarga ega Bi-YuHO'O' keramika ishlab chiqarish texnologiyasini olish" ilmiy loyihasini amalga oshirishda foydalanilgan (S.Seyfullin nomidagi Qozog'iston agrotexnika tadqiqot universiteti 25.09.2023 y. dagi №2775/1.2.1.11.1 sonli ma'lumotnomasi). Dissertatsiyaning ilmiy natijalaridan foydalanish o'tao'tkazgichlarning kritik parametrlarini yaxshilashga imkon berdi, ya'ni pinning nanomarkazlarini yaratish uchun nanodispersli magnit va o'tga chidamli kukunlarni kiritish orqali IQ isitish natijasida olingan YuHO'O' keramika kritik transport toki zichligini oshiradi, va uyurmali magnit oqimlarini to'xtatish, shuningdek, tashqi ta'sirlar (bosim) tufayli kupratlarning kritik haroratini oshirish mexanizmini tushunishga imkon berdi.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 15 ta xalqaro va respublika miqyosidagi anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 22 ta ilmiy ish chop etilgan. Jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda 7 ta maqola, shundan 1 tasi Web of Science va 1 tasi Scopus bazasidagi jurnallarda nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati, e'lon qilingan ishlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 116 betni tashkil qiladi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida ilmiy izlanish mavzusining dolzarbligi va zarurati tushuntirilgan. Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi keltirilgan. Muammoning o‘rganilganlik darajasi, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, tadqiqotning ilmiy yangiligi, amaliy natijalari keltirilgan. Tadqiqot ishining approbatsiyasi va tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi haqida qisqacha ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Yuqori haroratli o‘tao‘tkazuvchan kupratlar”** deb nomlangan birinchi bobida adabiyotlarda e‘lon qilingan natijalar sharhi berilgan. Adabiyotlar tahlili asosida tadqiqot masalasining qo‘yilishi keltiriladi.

Dissertatsiyaning **“Kupratlar uchun polaron va bipolaron yondashuvlar”** deb nomlangan ikkinchi bobida kontinual va panjara polaronlari nazariyalari, kengaytirilgan Holstein-Hubbard modeli va uning kupratlarda qo‘llanilishi berilgan.

Kupratlar kuchli bog‘langan elektron (yoki kovak) va kuchli bog‘langan elektron-fonon tizimi sifatida tavsiflanadi. Bunday tizimlarni kengaytirilgan Holstein-Hubbard modelida o‘rganish qulay hisoblanadi. Modelda tizimning to‘liq gamiltoniani quyidagi

$$H = H_e + H_{ph} + H_V + H_{e-ph} \quad (1)$$

ko‘rinishda yoziladi. Birinchi had elektronlarning gamiltoniani bo‘lib, quyidagicha ko‘rinishda ifodalaniladi.

$$H_e = \sum_{n \neq n'} T(n - n') c_n^\dagger c_{n'}, \quad (2)$$

bunda  $T(n - n')$ –sakrash integrali bo‘lib, u  $n$ – va  $n'$ –qo‘shni tugunlar orasidagi elektronlarning sakrashini,  $c_n^\dagger(c_n)$ – $n$  tugunda elektronni yaratish (yo‘q qilish) operatorini tavsiflaydi. 1-formulaning ikkinchi hadi fononlar sistemasining gomiltonianini bildiradi va quyidagicha yoziladi

$$H_{ph} = \sum_{q,\alpha} \hbar\omega_{q\alpha} (d_{q\alpha}^\dagger d_{q\alpha} + 1/2). \quad (3)$$

Bu ifodadagi  $d_{q\alpha}^\dagger(d_{q\alpha})$ –yaratilish (annigilyatsiya)  $\alpha$  ( $\alpha = x, y, z$ ) qutblanish va to‘lqin vektori  $q$  bo‘lgan fonon operatori,  $\omega_{q\alpha}$ –fonon chastotasini bildiradi. 1-formulaning uchinchi hadi

$$H_V = \sum_{n \neq n'} V_C(n - n') c_n^\dagger c_n c_{n'}^\dagger c_{n'} \quad (4)$$

ko‘rinishida yozilib,  $n$  va  $n'$  panjara tugunlarida joylashgan elektronlarning Kulon kuchlari orqali o‘zaro ta’sir energiyasining gamiltonianini bildiradi. Bunday  $V_C(n - n')$ – $n$  va  $n'$  tugunlarda joylashgan ikkita elektronning Kulon potensial energiyasini tavsiflaydi. 1-formulaning to‘rtinchi hadi elektron-fonon o‘zaro ta’sir gamiltonianini bildirib, quyidagicha yoziladi.

$$H_{e-ph} = \sum_{nm\alpha} f_{m\alpha}(n) c_n^\dagger c_n \xi_{m\alpha} \quad (5)$$

bunda  $f_{m\alpha}(n)$ - $n$  tugundagi elektronni  $m$  tugundagi ion bilan “zichlik-siljish” tipidagi bog‘lanish kuchi,  $\xi_{m\alpha}$ - $m$  tugundagi ion tebranishlarining normal koordinatasini ifodalaydi. Uni fonon yaratish va yo‘q qilish operatori orqali quyidagicha ifodalash mumkin,

$$\xi_{m\alpha} = \sum_q \left( \sqrt{\frac{\hbar}{2NM\omega_{q\alpha}}} e^{iqm} d_{q\alpha}^\dagger + h.c. \right) \quad (6)$$

bunda  $N$ -tugunlar soni va  $M$ -ionning massasi.

Kengaytirilgan Holstein-Hubbard modeli elektron korrelyatsiyalarini va elektron-fonon o‘zaro ta’sirning uzoq masofali xususiyatlarini hisobga olishga imkon beradi. 1-formulada modelning gamiltoniani diskret panjarada polaron va bipolaronlar hosil bo‘lishini o‘rganish imkonini bersada, polaron massasini baholashda soddalik uchun 3-tenglamasiz va dispersiyasiz fononlar uchun hisoblashlarni bajaramiz.

Model doirasida kupratlardagi polaron massasi quyidagi formuladan hisoblanadi

$$m_p = m^* e^{g^2}. \quad (7)$$

Bunda,  $m^*$ -zaryad tashuvchisining effektiv massasi,  $g^2$ -polaron massasi eksponensial ortishi koefitsienti deb ataladi va quyidagi formula yordamida hisoblanadi

$$g^2 = \gamma \frac{E_p}{\hbar\omega}, \quad (8)$$

bunda  $\gamma$  quyidagi

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_m f_m(n) f_m(n+a)}{\sum_m f_m^2(n)} \quad (9)$$

formula yordamida hisoblanuvchi sonli koefitsient,

$$E_p = \frac{1}{2M\omega^2} \sum_m f_m^2(n) \quad (10)$$

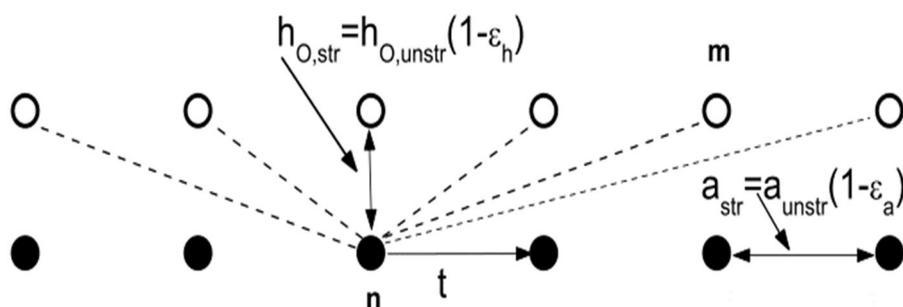
formula yordamida hisoblanuvchi polaron energiyasi. Uning qiymati taranglik yo‘q bo‘lgan paytda  $T_c = T_{BEK}$  bo‘ladigan qilib tanlanadi hamda  $\hbar\omega = 0.075$  eV deb olinadi.  $M$ -apikal kislorod ionlari massasi va  $f_m(n)$ - EFT kuchi quyidagi formuladan hisoblanadi

$$f_m(n) = \frac{\kappa h_o (1 - \varepsilon_h)}{[|(n-m)(1 - \varepsilon_a)|^2 + (h_o (1 - \varepsilon_h))^2]^{3/2}}, \quad (11)$$

bunda  $\kappa$ -biror koefitsient,  $|n-m|$ -panjara doimiysi birliklarida o‘lchanuvchi masofa,  $h_o$ -mis va apikal kislorod ionlari orasidagi masofani bildiradi,  $\varepsilon_a = (a_{unst} - a_{str}) / a_{unst}$  va  $\varepsilon_h = (h_{o,unst} - h_{o,str}) / h_{o,unst}$  formulalar bilan hisoblanib, mos ravishda  $a$ - va  $c$ - o‘qining tarangligini xarakterlaydi.

$$m_{ab} = m_p / \gamma_m^{(1/3)} \quad (12)$$

formula tekislikdagi polaron massasini hisoblashda foydalaniladi. Quyida LSCO kupratini o‘rganish uchun model panjarasini keltiramiz (1-rasm).



**1-rasm. LSCO kupratini o‘rganish uchun taklif etilgan panjara modeli. Elektron bir o‘lchovli ionlar zanjirida (pastki zanjir –qora doiralar) sakrab o‘tadi va yuqori zanjirning barcha ionlari (yuqori zanjir – ochiq doiralar bilan zichlikdagi siljish kuchi orqali ta’sirlashadi.**

Endi 1-rasm va yuqoridagi formulalarni unga qo‘llash orqali olingan natijalarni taqdim etamiz (1-jadval).

**1-jadval**

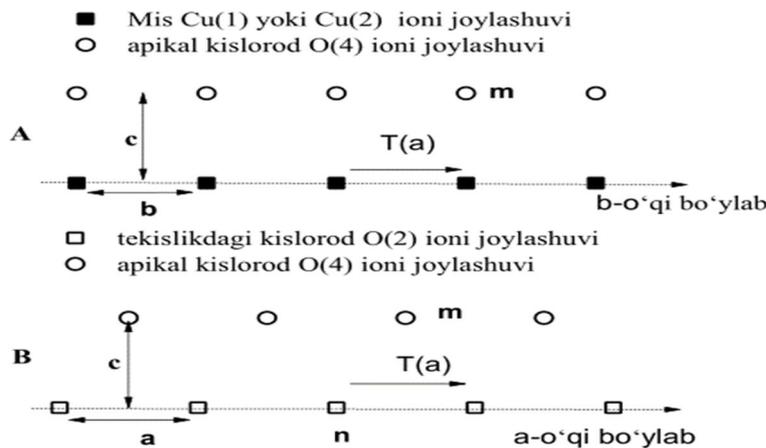
LaSrAlO<sub>4</sub> (LSAO) va SrTiO<sub>3</sub> (STO) tagliklarida o‘stirilgan LSCO kuprat yupqa pardasining qalinligi 500 Å bo‘lgan holati uchun hisoblangan polaron energiyasi, gamma sonli koeffitsient, hajmiy va tekislikdagi polaron massalarining Sr ning bir necha legirlash darajalari uchun hisoblangan qiymatlari. Pardaning *a*-o‘qi bo‘ylab taranglik qiymatlari Naito v. b. (Naito et al., Physica C 546, 84 (2018)) ishidan olindi. *c*-o‘qi bo‘ylab taranglik qiymatlari Sato H va Naito M (Sato H and Naito M Physica C 274, 221(1997)) ishidagi LSCO ning 2000 Å qalinlikdagi orasidagi bog‘liqliklarga ko‘ra hisoblandi.

$x$		0.0750	0.1000	0.1125	0.1250	0.1375	0.1500	0.2000	0.2500
$\epsilon_a, \%$	LSAO	0.8750	0.7500	0.7230	0.6600	0.6150	0.5700	0.4400	0.3200
	STO	-3.0600	-3.1900	-3.2350	-3.2800	-3.3250	-3.3700	-3.5100	-3.6300
$\epsilon_c, \%$	LSAO	-1.0259	-1.0300	-0.9525	-0.9531	-0.8309	-0.9273	-1.0766	-1.4346
	STO	0.7650	0.7975	0.8087	0.8200	0.8312	0.8425	0.8775	0.9075
$E_p, eV$	LSAO	0.4731	0.3991	0.4001	0.4105	0.3819	0.3740	0.3947	0.4916
	STO	0.5379	0.4549	0.4538	0.4660	0.4301	0.4246	0.4543	0.5825
$\gamma$	LSAO	0.6767	0.6784	0.6785	0.6788	0.6805	0.6789	0.6782	0.6757
	STO	0.7219	0.7239	0.7234	0.7237	0.7240	0.7237	0.7252	0.7273
$m_{ab}, m_e$	LSAO	13.1483	6.8073	6.8732	7.5627	5.8899	5.4407	6.5356	15.4496
	STO	32.5717	14.8700	14.6617	16.5292	11.7015	11.0831	14.8963	52.2740
$m_p, m_e$	LSAO	71.3800	36.9558	37.3137	41.0568	31.9756	29.5370	35.4808	83.8734
	STO	176.826	80.7268	79.5959	89.7343	63.5253	60.1682	80.8696	283.789

1-jadvalda ko‘rinib turganidek LSAO tagligida o‘stirilgan LSCO yupqa pardasi *a*-o‘qi bo‘ylab siqilish tarangligiga uchragan vaqtda, STO tagligida o‘stirilgan LSCO

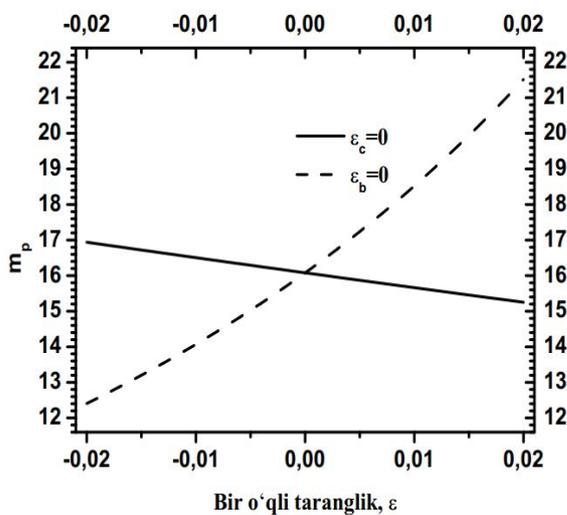
yupqa pardasi cho‘zilish tarangligiga uchraydi. Bundan tashqari STO tagligida o‘stirilgan LSCO yupqa pardasidagi polaron massasi LSAO tagligida o‘stirilgan LSCO yupqa pardasidagi polaron massasidan ancha kata bo‘ladi. LSCO pardasi ( $x = 0.15$ ) uchun nazariy natijalar LSCO ( $x = 0.16$ ) uchun Post va boshqalar (Post K et al., Phys. Rev. B. 103, 134515 (2021)) ning  $4.9 \pm 0.8 m_e$  natijalariga juda yaxshi mos keladi.

Endi YBCO kuprati uchun model panjarasini keltiramiz (2-rasm).

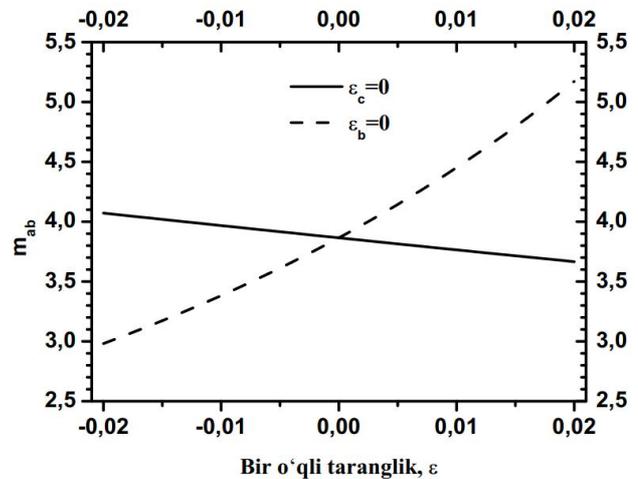


**2-rasm. YBCO kupratini o‘rganish uchun taklif etilayotgan panjara modeli. A rasmda qatlamlashgan struktura tasvirlangan va u  $b$ -o‘qi bo‘ylab, B ramda zanjirsimon struktura tasvirlangan va u  $a$ -o‘qi bo‘ylab taranglikni o‘rganish imkonini beradi.**

Yuqorida keltirilgan fo‘rmulalarni YBCO kupratini o‘rganish uchun taklif etilgan panjara modeliga qo‘llab polaron massasini o‘rganish orqali quyidagi grafiklarni olamiz (3-4-rasmlar).



**3-rasm. YBCO kupratida hajmiy polaron massasi o‘zgarishining  $b$ - va  $c$ -o‘qi bo‘ylab bir o‘qli taranglikga bog‘liqligi. Massaning o‘zgarishi  $m_e$  birliklarida berilgan.**

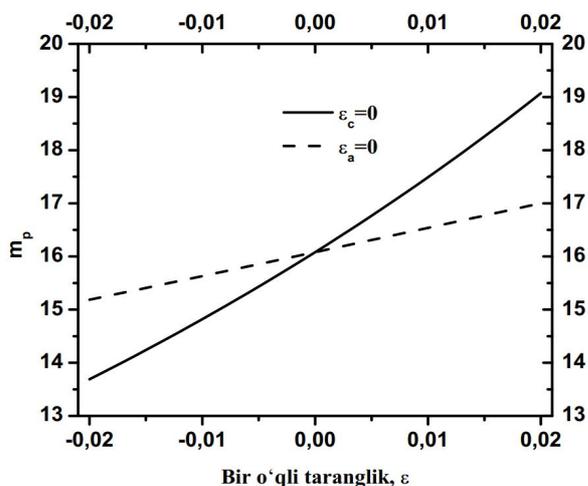


**4-rasm. YBCO kupratida tekislikdagi polaron massasi o‘zgarishining  $b$ -va  $c$ -o‘qi bo‘ylab bir o‘qli taranglikga bog‘liqligi. Massaning o‘zgarishi  $m_e$  birliklarida berilgan.**

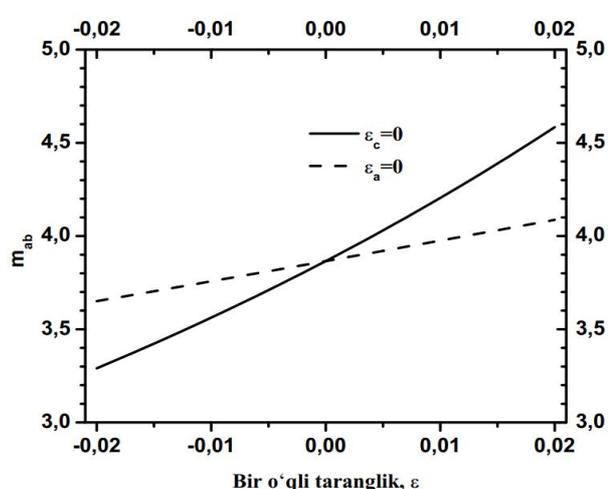
3-4-rasmlar 2-A rasmda (qatlamlashgan struktura) mos keladi. 3- va 4-rasmlardan ko‘rinib turganidek  $b$ -o‘qi bo‘ylab siqilish (cho‘zilish) tarangligi natijasida polaron massasi kamayadi (ortadi),  $c$ -o‘qi bo‘ylab siqilish (cho‘zilish)

tarangligi ta'sirida esa ortadi (kamayadi). Bunda taranglik nolga teng bo'lgandagi  $E_p = 0.418$  eV ga, sonli koeffitsient  $\gamma = 0.498$  ga teng.

Endi 2- B rasmdagi zanjirsimon struktura uchun shu o'rganishni bajarib quyidagi grafiklarni olamiz (5-6- rasmlar).



5-rasm. YBCO kupratida hajmiy polaron massasi o'zgarishining  $a$ - va  $c$ - o'qi bo'ylab bir o'qli taranglikga bog'liqligi. Massaning o'zgarishi  $m_e$  birliklarida berilgan.



6-rasm. YBCO kupratida tekislikdagi polaron massasi o'zgarishining  $a$ - va  $c$ - o'qi bo'ylab bir o'qli taranglikga bog'liqligi. Massaning o'zgarishi  $m_e$  birliklarida berilgan.

Bunda taranglik nolga teng bo'lgandagi  $E_p = 0.497$  eV ga, sonli koeffitsient  $\gamma = 0.419$  ga teng. Ikkala struktura uchun ham taranglik nolga teng bo'lgandagi polaron massasi  $m_p = 16.07 m_e$  va tekislikdagi polaron massasi  $m_{ab} = 3.865 m_e$  ga teng.

Dissertatsiyaning “**Bosim (taranglik) ta'siridagi La - asosli kupratlar**” deb nomlangan uchinchi bobida model doirasida quyidagilar bayon etilgan:

LSAO va STO tagliklarida yetishtirilgan LSCO kuprat yupqa pardasining o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining bir o'qli taranglik va legirlash darajasiga bog'liq ravishda o'zgarishi tushuntirilgan;

LSCO kuprat yupqa pardasining fazaviy diagrammasi tushuntirilgan;

LSCO kuprati o'tao'tkazuvchanlik kritik haroratining bir o'qli taranglik va bir o'qli bosim hosilalari bo'yicha izlanish natijalari taqdim etilgan.

Biz tugunlararo bipolaronlar ideal boze gazini hosil qiladi deb hisobladik va taranglikni Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi harorati bilan quyidagi formula orqali bog'laymiz

$$T_{BEK} = \frac{3.31 \hbar^2 n^{2/3}}{2k_B m^*} e^{-g^2}, \quad (13)$$

bu yerda  $\hbar$ –Plank doimiysi,  $k_B$ –Boltsman doimiysi,  $n$  –tugunlararo bipolaronlar zichligi. Taranglik  $g^2$  va  $n$  orqali  $T_{BEK}$  ga ta'sir qiladi. Taranglik ta'sirida namunaning boshlang'ish hajmi o'zgaradi. Natijada bipolaronlar zichligi quyidagi

$$n = n_0 (1 - \epsilon_a)(1 - \epsilon_b)(1 - \epsilon_{ho}) \quad (14)$$

formula orqali hisoblanadi (Jalekeshov et al., Physica C. 2023. 604. 1354177).

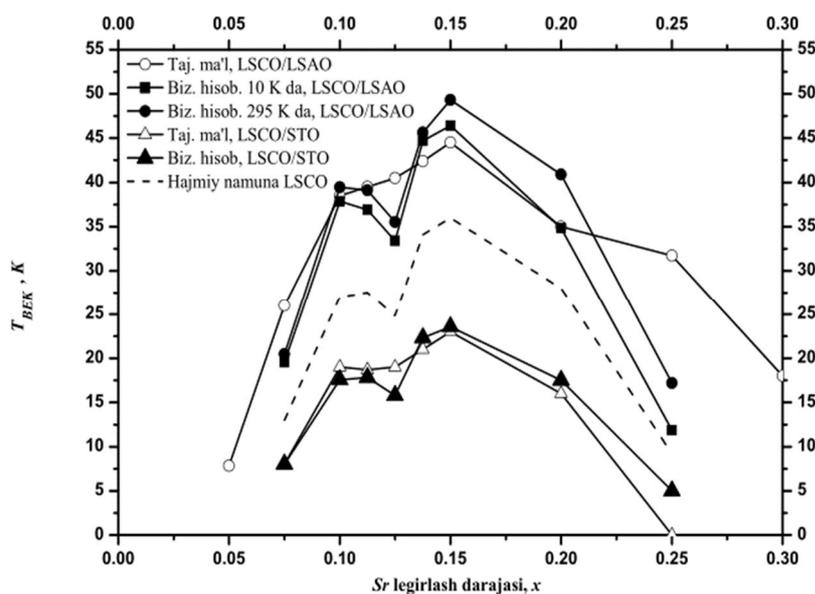
Ushbu hisoblashlarda biz kupratlar uchun quyidagi eksperimental ma'lumotlardan foydalanamiz: apikal kislorod ioni massasi  $M = 16 \text{ m. a. b}$  ( $2.6565032 \cdot 10^{-26}$ )  $kg$ , tugunlararo bipolaronlar boshlang'ich zichligi  $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ . 13-formula yordamida hisoblangan  $T_{BEK}$  ning raqamli qiymatlari 2-jadvalda keltirilgan (Jalekeshov et al., Journal of Superconductivity and Novel magnetism-2022. – № 12 – vol. 35. – pp. 3529-3536).

2-jadval.

LSAO va STO tagliklarida o'stirilgan LSCO pardasining qalinligi 500 Å bo'lgan holati uchun nazariy hisoblangan  $T_{BEK}$  va eksperimental  $T_c$  qiymatlari.

$x$		0.0750	0.1000	0.1125	0.1250	0.1375	0.1500	0.2000	0.2500
$T_{BEK}$ , K	LSAO	20.465	39.459	39.106	35.510	45.640	49.9031	40.903	17.1950
	STO	8.0370	17.5829	17.8254	15.8049	22.3165	23.552	17.500	4.9800
$T_c$ , K	LSAO	26.0	39.0	39.5	40.5	42.4	44.5	35.0	31.7
	STO	8.0	19.0	18.7	19.0	21.0	23.0	16.0	0

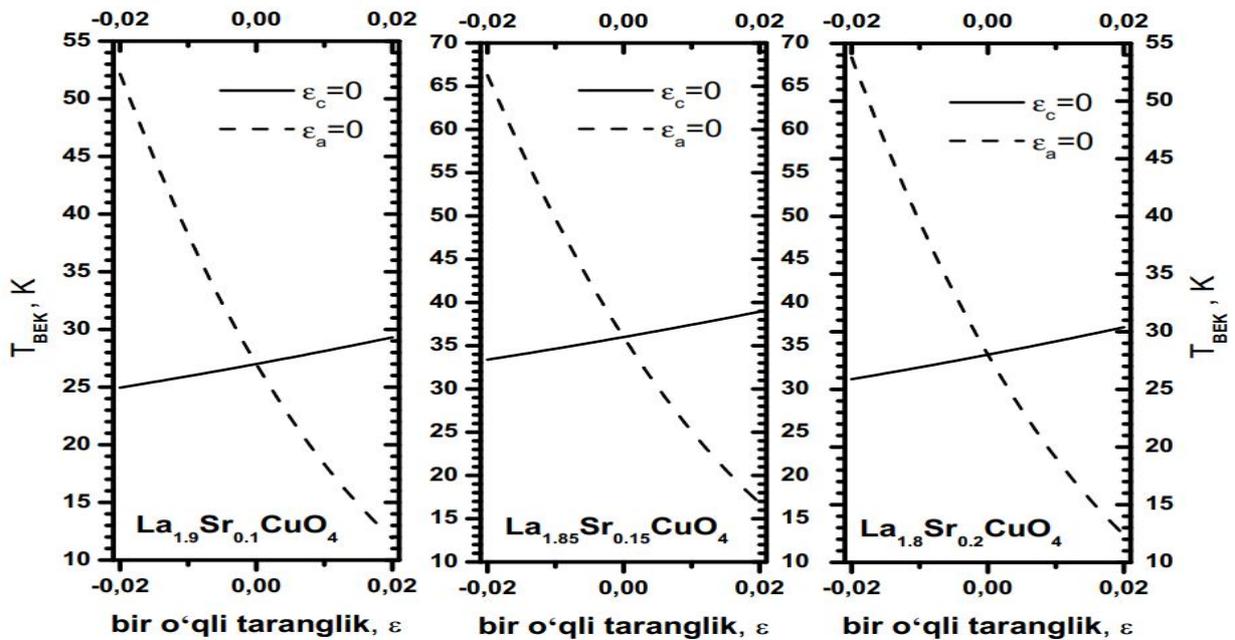
Eksperimental ma'lumotlar va nazariya natijalarini solishtirish yanada qulay bo'lishi uchun ular bir grafikga joylashtirildi (7-rasm)



7-rasm. LSCO kuprat hajmiy namunasi va kuprat yupqa pardasi uchun o'ta'otkazuvchanlik kritik haroratining Sr legirlash darajasi (x) ga bog'liqlik fazaviy diagrammasi. Tajriba natijalari va nazariy hisoblashlar natijalari keltirilgan.

2-jadval va 7-rasmdan ko'rib turganingizdek LSAO (STO) tagligida o'stirilgan LSCO pardasining  $T_c$  ( $T_{BEK}$ ) hajmiy namunanikidan katta (kichik). Ko'rinib turganidek nazariy natijalar tajriba natijalari bilan yaxshi mos kelmoqda. Bundan tashqari bizning model doirasida olingan natijalar kupratlarda kuzaatilishi aytilgan "1/8" anomalini ham o'zida aks ettirmoqda. Buni modelning bir yutug'i sifatida ta'kidlash mumkin.

Endi 13-formula yordamida  $T_{BEK}$  ga bir o'qli taranglikning ta'sirini o'rganamiz (8-rasm).



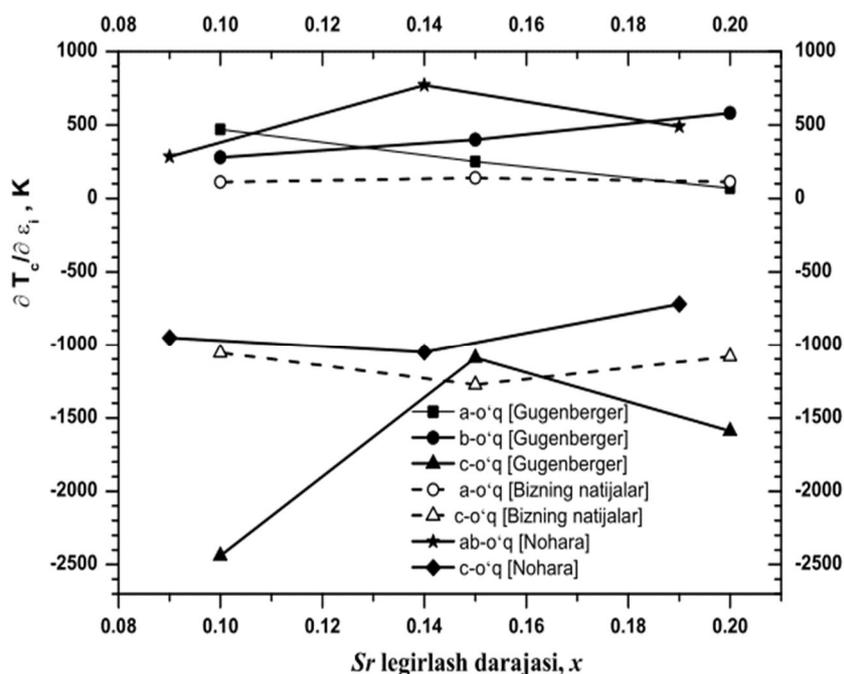
8-rasm. LSCO kuprati tugunlararo bipolaronlar  $T_{BEK}$  ning bir o'qli tarangliklar ( $\varepsilon_a$  va  $\varepsilon_c$ ) funksiyasi sifatida. Legirlash darajasining  $x = 0.1; 0.15; 0.2$  qiymatlariga mos ravishda chapdan o'ngga qarab tartiblangan.

$x = 0.1; 0.15; 0.2$  legirlash darajalariga mos ravishda, taranglikga uchramagan namunaning o'ta'kazuvchanlik kritik harorati  $T_{BEK} = T_c = 27, 36, 28$  K bo'lishi uchun  $E_p = 0.430, 0.427, 0.400$  eV ga teng qiymatlar mos ravishda tanlab olinadi.

8-rasmda keltirilgan o'rganish yordamida  $T_{BEK}$  ning bir o'qli taranglik bo'yicha hosilaviy qiymatlari ( $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_i$ ) ni o'rganamiz. Turli legirlash darajalari ( $x = 0.1; 0.15; 0.2$ ) uchun  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_i$  ning hisoblangan nazariy qiymatlarini adabiyotlardagi natijalar bilan solishtirish uchun bitta grafikka joylashtiramiz (9-rasm).

9-rasmdagi uzliksiz chiziqlar bilan tutashtirilgan shakillar tajriba natijalarini, uzoq chiziqlar bilan tutashtirilgan shakillar esa nazariya natijalarini bildiradi va ular orasida quyidagi bog'liqliklar mavjud: to'ldirilgan to'rtburchaklar ( $\blacksquare$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \varepsilon_a$  ni, to'ldirilgan doiralar ( $\bullet$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \varepsilon_b$  ni, to'ldirilgan uchburchaklar ( $\blacktriangle$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \varepsilon_c$  ni tavsiflab, Gugenberger va boshq. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) natijalarini bildiradi; to'ldirilgan chapga qayrilgan uchburchaklar ( $\blacktriangleleft$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \varepsilon_{ab}$  ni, to'ldirilgan o'ngga qayrilgan uchburchaklar ( $\blacktriangleright$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \varepsilon_c$  ni tavsiflab, Nohara va boshq. (Nohara et al., Phys. Rev. B 52, 570 (1995)) ishidagi natijalarni bildiradi; to'ldirilmagan doiralar ( $\circ$ )  $\leftrightarrow \partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_a$  va to'ldirilmagan uchburchaklar ( $\Delta$ )  $\leftrightarrow \partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_c$  ni tavsiflab, bizning natijalarimizni bildiradi.

9-rasmdagi natijalardan ko'rinib turganidek nazariy hisoblash natijalari tajriba natijalariga sifat jihatdan yaxshi, ayrim legirlash darajalarida qiymat jihatdan a'lo darajadagi mosliklarga ega.



9-rasm. LSCO kuprati  $T_c$  ning bir o'qli taranglik bo'yicha hosilaviy qiymatlari. Sr legirlash darajasining bir necha qiymati uchun keltirilgan. Nazariy hisoblash natijalarini solishtirish uchun adabiyotlardan olingan natijalar bilan bir grafikda keltirilgan.

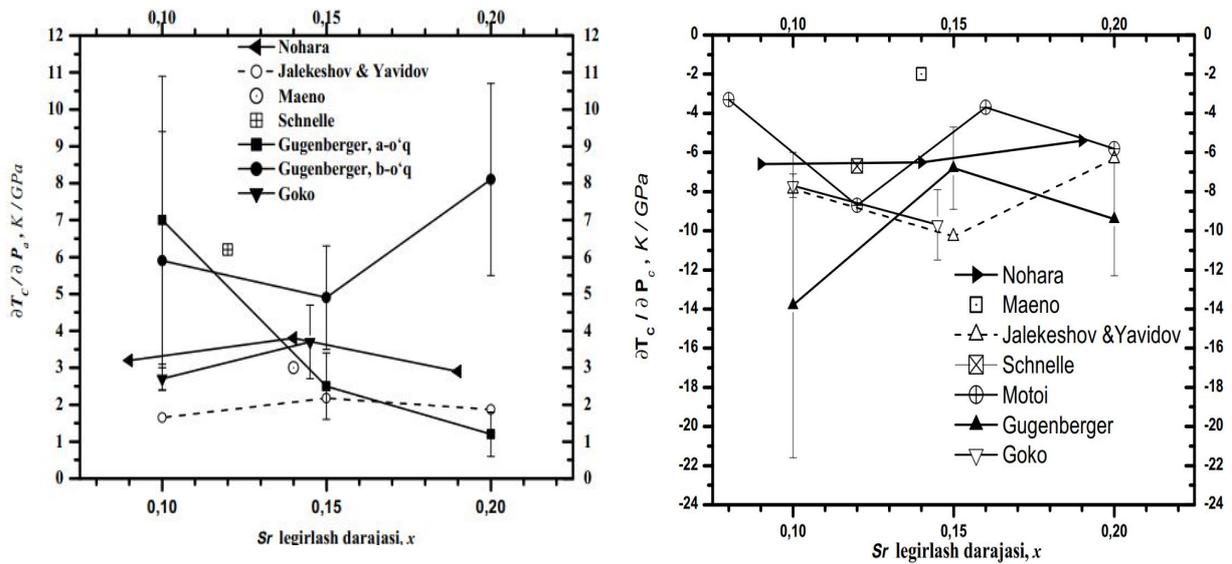
$T_{BEK}$  ning bir o'qli taranglik bo'yicha hosilaviy qiymatlaridan foydalangan holda bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlarini o'rganish mumkin. Bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlar ( $\partial T_{BEK} / \partial p_i$ ) quyida tenglamalar sistemasini yechish orqali hisoblanadi

$$\frac{\partial T_{BEK}}{\partial \varepsilon_i} = \sum_j C_{ij} \frac{\partial T_{BEK}}{\partial p_j}. \quad (15)$$

$\partial T_{BEK} / \partial p_i$  qiymatlarining qanday bo'lishi  $C_{ij}$  ning qaysi manbadan olinishiga bog'liq. Sababi  $C_{ij}$  ning son qiymatlari uchun turli adabiyotlarda turlicha ma'lumotlar keltirilgan. Oxirgi ishlarda, LSCO ning bizga kerakli legirlash darajalari uchun keltirilgan  $C_{ij}$  ning to'liq to'plamini topa olmadik. Shu sababli nazariy ishlardagi ma'lumotlardan foydalanishni ma'qul deb bildik.  $x = 0.1$  va  $x = 0.15$  legirlash darajalari uchun Singh va boshq. (Singh et al., Physica C 419, 1 (2005)) ishida keltirilgan,  $x = 0.2$  legirlash darajasi uchun Jayachandran va boshq. (Jayachandran K and Menon C Physica C. 454, 27 (2007)) ishida keltirilgan  $C_{ij}$  qiymatlaridan foydalandik.

15-formula yordamida nazariy yo'l bilan hisoblangan  $\partial T_{BEK} / \partial p_i$  qiymatlari va tajribalarda aniqlangan  $\partial T_c / \partial p_i$  qiymatlari solishtirish qulay bo'lishi uchun bir rasmga joylashtirildi (10-rasm).

10-rasmdagi uzliksiz chiziqlar bilan tutashtirilgan shakillar va yakka o'zi turgan shakillar tajriba natijalarini, uzoq chiziqlar bilan tutashtirilgan shakillar esa nazariya natijalarini bildiradi va ular orasida quyidagi bog'liqliklar mavjud:



10-rasm. LSCO kuprati  $\partial T_c / \partial p_i$  ( $i = a, b, c$ ) qiymatlari. Chapda  $a$ -,  $b$ - o'q, o'ngda  $c$ -o'q bo'ylab. Legirlash darajasi-  $x$  ning bir necha qiymatlari uchun nazariy hisoblash natijalari va tajriba natijalari bir rasmda keltirilgan.

to'ldirilgan to'rtburchaklar ( $\blacksquare$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_a$ , to'ldirilgan doiralar ( $\bullet$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_b$  ni, to'ldirilgan uchburchaklar ( $\blacktriangle$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  ni tavsiflab, Gugenberger va boshq. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) natijalarini; to'ldirilgan chapga qayrilgan uchburchaklar ( $\blacktriangleleft$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$  ni, to'ldirilgan o'ngga qayrilgan uchburchaklar ( $\blacktriangleright$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  ni tavsiflab, Nohara va boshq. (Nohara et al., Phys. Rev. B 52, 570 (1995)) ishidagi natijalarni; + belgili aylanalarda ( $\oplus$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  bildirib Motoi va boshq. (Motoi et al., J. Phys. Soc. Japan. 60, 384 (1991)) natijasini, + belgili to'rtburchaklar ( $\boxplus$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$  ni, x belgili to'rtburchaklar ( $\boxtimes$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  ni tavsiflab Schnelle va boshq. (Schnelle et al., Phys. And Mat. Scien. Of HTS,II 1992, 151) natijalarini; markazida nuqta belgisi bor aylanalarda ( $\odot$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$  ni, markazida nuqta belgili to'rtburchaklar ( $\boxdot$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  ni tavsiflab Maeno va boshq. (Maeno et al., Springer Japan 103,(1994)) natijalarini; to'ldirilgan pastga qaragan uchburchaklar ( $\blacktriangledown$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$  ni, to'ldirilmagan pastga qaragan uchburchaklar ( $\nabla$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  ni tavsiflab Goko va boshq. (Goko et al., Jour. of the Phys. Soc. Japan 68, 3074 (1999)) natijalarini; to'ldirilmagan doiralar ( $\circ$ )  $\leftrightarrow \partial T_{BEK} / \partial p_a$  va to'ldirilmagan uchburchaklar ( $\Delta$ )  $\leftrightarrow \partial T_{BEK} / \partial p_c$  ni tavsiflab, bizning natijalarni (Jalekeshov A and Yavidov B, Physica C 64, 1354177 (2023)) bildiradi.

10-rasmdan ko'rish mumkinki  $a$ -o'qi bo'ylab natijalarimiz adabiyotlar natijalariga sifat jihatdan mos keladi, hamda  $x = 0.15$  dan boshlab Gugenberger va boshq. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) natijalarining xatoliklari oraliq'ida yotadi. Hatto bir nuqtada mutloq moslikga ega.  $c$ -o'qi bo'ylab natijalarimiz ham adabiyotlardagi natijalarga sifat jihatdan yaxshi mos keladi.  $x = 0.1$  dan  $x = 0.145$  gacha bo'lgan oraliqda Goko va boshq. (Goko et al., Jour. of the Phys. Soc. Japan 68, 3074 (1999)) natijalarining qiymatlariga juda yaqin va xatoliklari oraliq'ida yotadi. Bu oraliqda Gugenberger va boshq. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) ishi natijalarining ham xatoliklari oraliq'ida joylashgan.

Bundan tashqari  $x = 0.12$  da Motoi va boshq. natijasi bilan a'lo darajadagi moslikga ega.  $x = 0.2$  da esa Motoi va boshq. (Motoi et al., J. Phys. Soc. Japan. 60, 384 (1991)) ishi natijasiga juda yaqin joylashgan. Shu bilan birga Gugenberger va boshq. ishi natijalari xatoliklari oralig'ida yotadi. Albatta nazariy o'rganishlarimizda tajriba natijalari bilan nomuvofiqliklar ham mavjud. Bunga  $C_{ij}$  qiymatlarining turlicha tanlanishi ham sabab deb bilamiz. Xususan, Gugenberger va boshq. o'z ishida uch xil legirlash darajasi uchun ham O'O' bo'lmagan  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  ga tegishli  $C_{ij}$  qiymatlaridan, Nohara va boshq. ham uch xil legirlash darajasi uchun ham  $\text{La}_{1.86}\text{Sr}_{0.14}\text{CuO}_4$  ga tegishli  $C_{ij}$  qiymatlaridan foydalanib  $\partial T_c / \partial p_i$  qiymatlarini hisoblaganini yozadi. Nazarimizda bu biroz noto'g'ridek. LSCO kuprati uchun modelimizning yutuqlari (tajriba natijalari bilan mosliklar sababi) va kamchiliklarini (nomutanosibliklar sabalari) quyida muhokama qilamiz. Dastlab yutuqlarni keltiramiz:

1. Foydalanilgan modelimiz kupratlarning asosiy xususiyatlarini, ya'ni zaryad tashuvchilarining (polaron va bipolaronlar) holati va dinamikasini aniqlaydigan kuchli elektron-fonon o'zaro ta'sirini hisobga oladi;

2. Modelimiz kupratlarni kvazi-2D struktura deb hisoblaydi. Bunda (bi)polaronlar dinamikasi nafaqat  $\text{CuO}_2$  – tekislik ionlari panjarasining dinamikasi (ya'ni *ab*-tekislik) bilan belgilanadi, balki *ab*- tekislikdan tashqari apikal kislorod ionlari bo'lgan ionlar tebranishlari bilan ham boshqariladi;

3. Shuningdek, kupratlarning kristall tuzilishidagi panjara tarangliklarini, xususan, bir vaqtning o'zida barcha yo'nalishda taranglikka uchragan kuprat yupqa pardadagi bosimlarni ham hisobga olishga qodir;

4. Ko'pgina tajribalarda kuzatilganidek, bizning modelimiz yupqa kuprat pardalarning *ab*-tekisligi siqilganida (cho'zilganida) hajmiy namuna  $T_{BEK}$  ning yuqori (past) qiymatini beradi. Kuprat pardasining *c*-o'qi cho'zilganda (siqilganda) ham xuddi shunday bo'ladi.

Endi esa nomutanosibliklarni izohlashga harakat qilamiz:

1. Kengaytirilgan Holstein-Hubbard modelidan kuchli bog'lanish rejimida va noadiabatik chegarada foydalanish, real vaziyatda kupratlar ba'zi legirlash darajalarida elektron-fonon bog'lanishning o'rtacha qiymatlarida, shuningdek adiabatikaning oraliq rejimlarida bo'lishi mumkin;

2. Eng soda bo'lgan panjara modelini tanlash. Bu bir o'lchovli. Aslida esa, LSCO ning uch o'lchovli kristall tuzilishini ko'rib chiqish kerak;

3. 11-formula ko'rinishida electron-fononli "zichlik-siljish" tipidagi kuchni tanlash, bu Frohlich tipidagi EFT kabi kupratlarda  $E_p$  qiymatining kam baholanishiga olib kelishi mumkin;

4. KHH modelidagi (bi)polaron massasini baholash kupratlarda muhim bo'lgan korrelyatsiya effektini e'tiborsiz qoldiradi;

5. Bipolaronlar ideal gaz hosil qiladi degan taxmindan foydalanishdir (ularning Boze Eynshteyn kondensatsiya (BEK) harorati 13-formula bilan aniqlanadi). 7-rasmdagi natijalardan ko'rinib turibdiki, bunday taxmin kam va optimal legirlangan

rejimlarda haqiqiy bo‘lishi mumkin, lekin, yuqori legirlash darajalarida u  $T_{BEK}$  qiymatlarini kam baholaydi.

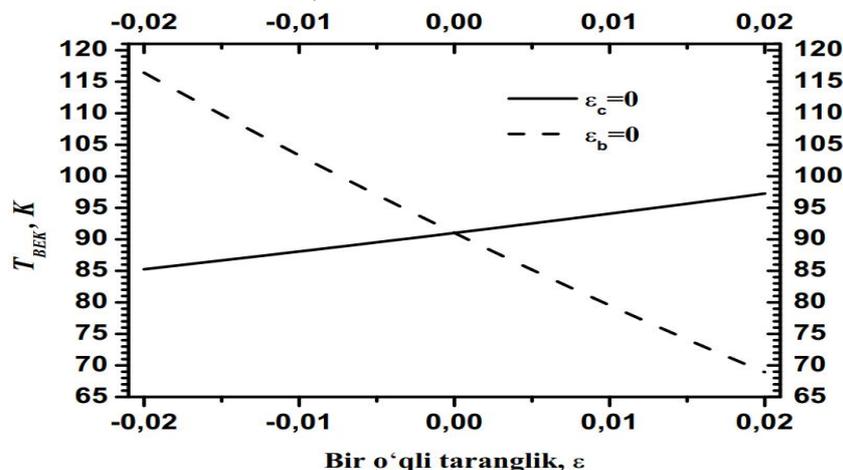
Yuqoridagi barcha fikrlar nomuvofiqliklarga hissa qo‘shishi mumkin. Sanab o‘tilgan nazariy sabablarga qo‘shimcha ravishda, tajribalarda  $T_c$  ning turli metodlarda o‘lchanishini ham keltirish mumkin. Adabiyotlarda  $T_c$  boshlang‘ich harorat, o‘rta nuqta harorati va qarshilikning 90 % ga teng bo‘lgan harorat, shuningdek nol qarshilik harorati sifatida o‘lchangan eksperimental ishlarini topish mumkin. Fikrimizcha, bu holatlar bizning  $T_{BEK}$  va eksperimental  $T_c$  o‘rtasida qandaydir nomuvofiqliklarni keltirib chiqarishi mumkin. Shunga qaramay, bizning raqamli natijalardan ko‘rinib turganidek, modelimiz LSAO va STO tagliklarida o‘stirilgan LSCO kuprat yupqa pardalarining  $T_c$  qiymatini qoniqarli tarzda tushuntiradi. Yuqoridagilardan xulosaga kelish mumkinki, hatto bunday oddiy taxminlar bilan ham modelimiz LSCO kuprat yupqa pardasining asosiy fizikasini qamrab oladi.

Bob xulosasi sifatida LSCO kupratining “1/8” anomaliyalii fazaviy diagrammasini olish va o‘ta‘tkazuvchanlik kritik haroratini o‘rganishda polaron samarasi yuqori ahamiyatga ega ekanligi ta’kidlangan.

Dissertatsiyaning “**Bosim (taranglik) ta’siridagi Y - asosli kupratlar**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida model doirasida, bir o‘qli taranglik ta’sirida YBCO kuprat hajmiy namunasi o‘ta‘tkazuvchanlik kritik haroratining qanday o‘zgarishi va uning bir o‘qli taranglik va bir o‘qli bosim hosilalari bo‘yicha tadqiqot natijalari keltiriladi.

13-formula yordamida YBCO kuprati  $T_{BEK}$  ning bir o‘qli taranglik ta’sirida qanday o‘zgarishini o‘rganamiz. Avval takidlaganimizdek YBCO kristall strukturasi qatlamlashgan va zanjirsimon stukturadan iborat. Dastlab qatlamlashgan struktura uchun o‘rganishlarni amalga oshiramiz va natijani 11-rasmda keltiramiz.

11-rasmda 2-A rasmdagi panjara uchun tugunlararo bipolaronlar  $T_{BEK}$  ning  $b$ -o‘qi bo‘ylab  $\varepsilon_b$  (quyuq chiziq) va  $c$ -o‘qi bo‘ylab  $\varepsilon_c$  (uzuq chiziq) tarangliklarga bog‘liq o‘zgarishi keltirilgan. Biz  $T_{BEK}$  qiymatini  $\varepsilon_i = 0$  ( $i=b,c$ ) da yuqori  $T_c$  li YBCO kupratining  $T_c = 91$  K qiymatiga teng qilib olamiz.



11-rasm. YBCO kuprati  $T_{BEK}$  ning bir o‘qli taranglik ta’sirida o‘zgarishi. 2-A rasmdagi qatlamlashgan struktura uchun.

11-rasmdan ko‘rayotganimizdek  $b$  ( $c$ )-o‘qi bo‘ylab siqlish natijasida  $T_{BEK}$  ning qiymati ortadi (kamayadi). Aslida ham shunday bo‘lishi kerak. 3-4-rasmlarda

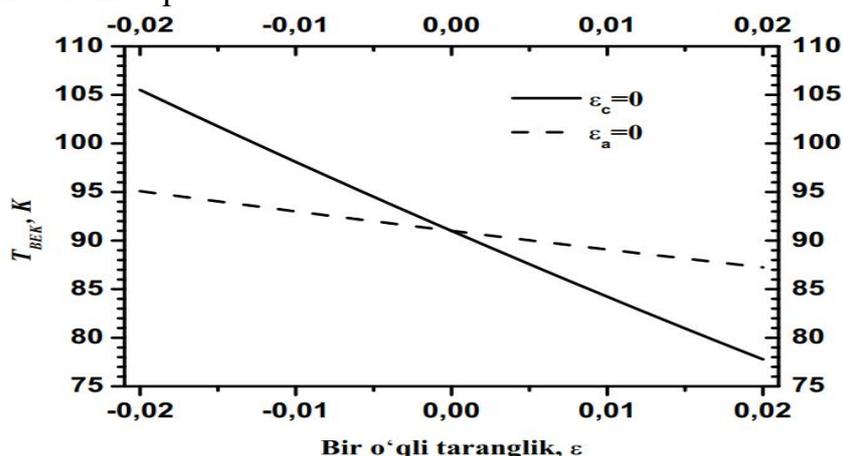
ko‘rinib turibdiki  $b(c)$ -o‘qi bo‘ylab siqilish natijasida polaron massasi kamayadi (ortadi). Bu esa  $T_{BEK}$  ning ortishiga olib keladi. Chunki polaron massasining kamayishi bilan u oson harakatlana boshlaydi.  $b(c)$ - o‘qi bo‘ylab cho‘zilish natijasida polaron massasi ortadi (kamayadi). Natijada esa  $T_{BEK}$  ning qiymati kamayadi (ortadi). Sababi massaning ortishi zaryad tashuvchilar (polaron) harakatchanligini pasaytiradi.

Keyin esa shu o‘rganishlarni zanjirsimon stuktura uchun ham bajaramiz. Bu 2-B rasmda keltirilgan strukturaga mos keladi.

12-rasmda 2-B rasmdagi panjara uchun tugunlararo bipolaronlar  $T_{BEK}$  ning  $a$ -o‘qi bo‘ylab  $\varepsilon_a$  (quyuq chiziq) va  $c$ - o‘qi bo‘ylab  $\varepsilon_c$  (uzuq chiziq) tarangliklarga bog‘liq o‘zgarishi keltirilgan. Biz  $T_{BEK}$  qiymatini  $\varepsilon_i = 0$  ( $i=b,c$ ) da yuqori  $T_c$  li YBCO kupratining  $T_c = 91$  K qiymatiga teng qilib olamiz.

12-rasmdan ko‘rayotganimizdek  $a(c)$ - o‘qi bo‘ylab siqilish (cho‘zilish) natijasida  $T_{BEK}$  ning qiymati kamayadi (ortadi). 5-6- rasmlardan ko‘rinadiki  $a(c)$ -o‘qi bo‘ylab siqilish (cho‘zilish) natijasida polaron massasi ortadi (kamayadi). Bu esa  $T_{BEK}$  ning kamayishiga (ortishiga) olib keladi. Sababi massaning ortishi (kamayishi) zaryad tashuvchilar (polaron) harakatchanligini pasaytiradi (oshiradi).

YBCO kuprati qatlamlashgan strukturasi uchun  $T_{BEK}$  ga bir o‘qli taranglik ta’sirini o‘rganish natijalari, LSCO kuprati uchun  $T_{BEK}$  ga bir o‘qli taranglik ta’sirini o‘rganish natijalariga sifat jihatdan mos keladi. Bu modelni LSCO kupratidan boshqa kupratlarga ham qo‘llash mumkinligidan dalolat beradi. Chunki YBCO kupratining LSCO kupratidan farqi qatlamlashgan stuktura bilan birgalikda zanjirsimon strukturaga ham ega ekanligidadir. Qolaversa model doirasidagi o‘rganishlar, taranglikning ta’sirida zaryad tashuvchilar massasining o‘zgarishi va buning natijasida  $T_c$  ning o‘zgarishi haqida adabiyotlarda keltirilgan natijalarga ham mos kelmoqda.



12-rasm. YBCO kuprati  $T_{BEK}$  ning bir o‘qli taranglik ta’sirida o‘zgarishi. 2-B rasmdagi zanjirsimon stuktura uchun.

Endi esa yuqorida YBCO kuprati  $T_c$  ga bir o‘qli taranglikning ta’siridan foydalanib,  $\partial T_c / \partial \varepsilon_i$  qiymatlarini o‘rganamiz. Adabiyotlarda keltirilishicha YBCO kuprati uchun  $a$ - va  $b$ - kristallografik o‘qlari bo‘yicha  $\partial T_c / \partial \varepsilon_i$  qiymatlari qarama-qarshi belgilarga ega:  $\partial T_c / \partial \varepsilon_a < 0$  va  $\partial T_c / \partial \varepsilon_a > 0$ .  $\partial T_c / \partial \varepsilon_c$  qiymatlari keng

oraliqda yotadi, lekin ularning barchasi manfiy. 11-rasmdagi (2-A rasmdagi qatlamlashgan struktura) holat uchun  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_b = +300 K$  va  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_c = -1187 K$ , 12-rasmdagi (2-B rasmdagi zanjirsimon struktura) holat uchun  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_a = -693 K$  va  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_c = -196 K$  (Jalekeshov A va Yavidov B. Fan va Jamiyat. 1, 12 (2023)) qiymatlarni olamiz.

Yuqorida keltirilgan  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_i$  qiymatlarini 15-tenglamalar sistemasiga qo'yib yechish orqali YBCO kuprati uchun  $\partial T_{BEK} / \partial p_i$  qiymatlarini hisoblaymiz. YBCO kuprati uchun adabiyotlarda keltirilgan  $\partial T_c / \partial p_i$  ning qiymatlaridan turli tajribalarning natijalari turlicha qiymatlarni berayotganligini ko'rish mumkin. Sababi ular 15-tenglamalar sistemasini yechishda  $C_{ij}$  ning turlicha qiymatlaridan foydalanadilar. Biz ham nazariy hisoblashda turli adabiyotlardagi  $C_{ij}$  ning qiymatlaridan foydalanib bir necha xildagi qiymatlarni hisobladik. Hisoblash natijalari  $C_{ij}$  ning tanlanishiga qarab turlicha bo'ladi. Quyida biz (Jalekeshov A va Yavidov B. Fan va Jamiyat. 1, 12 (2023)) to'rt xil  $C_{ij}$  to'plamidan foydalangan xolda hisoblagan natijalar keltirdik:

Ludwig va boshq. (Ludwig et al., Physica C 197, 113 (1992)) ishida keltirilgan  $C_{ij}$  qiymatlaridan foydalanib,  $\partial T_{BEK} / \partial p_a = -3.851$ ,  $\partial T_{BEK} / \partial p_b = 3.199$  va  $\partial T_{BEK} / \partial p_c = -0.955$  (hammasi K/GPa birliklarida);

Ledbetter va boshq. (Ledbetter et al., J. of Mat. Res. 6, 2253 (1991)) ishida keltirilgan  $C_{ij}$  qiymatlaridan foydalanib,  $\partial T_{BEK} / \partial p_a = -3.146$ ,  $\partial T_{BEK} / \partial p_b = 1.984$  va  $\partial T_{BEK} / \partial p_c = -0.728$  (hammasi K/GPa birliklarida);

Lei va boshq. (Lei et al., Phys. Rev. B. 47, 6154 (1993)) ishida keltirilgan  $C_{ij}$  qiymatlaridan foydalanib,  $\partial T_{BEK} / \partial p_a = -4.889$ ,  $\partial T_{BEK} / \partial p_b = 3.955$  va  $\partial T_{BEK} / \partial p_c = -1.207$  (hammasi K/GPa birliklarida);

Reichardt va boshq. (Reichardt et al., Supercon. Sci. and Tech. 1, 173 (1988)) ishida keltirilgan  $C_{ij}$  qiymatlaridan foydalanib  $\partial T_{BEK} / \partial p_a = -4.153$ ,  $\partial T_{BEK} / \partial p_b = 3.484$  va  $\partial T_{BEK} / \partial p_c = -0.860$  (hammasi K/GPa birliklarida).

Nazariy natijalarni solishtirish uchun tajribalarda keltirilgan qiymatlarni ham keltiramiz:

Welp va boshq. (Welp et al., Phys. Rev. Lett. 69, 2130 (1992)) ishida  $\partial T_c / \partial p_a = -2 \pm 0.2$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 1.9 \pm 0.2$  va  $\partial T_c / \partial p_c = -0.3 \pm 0.1$  (hammasi K/GPa birliklarida);

Bud'ko va boshq. (Bud'ko et al., Phys. Rev. B. 46, 1257 (1992)) ishida  $\partial T_c / \partial p_a = -3.06 \pm 0.35$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 0.38 \pm 0.18$  va  $\partial T_c / \partial p_c = 3.45 \pm 0.43$  (hammasi K/GPa birliklarida);

Meingast va boshq. (Meingast et al., Phys. Rev. Lett. 67, 1634 (1991)) ishida  $\partial T_c / \partial p_a = -1.9$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 2.2$  va  $\partial T_c / \partial p_c = 0$  (hammasi K/GPa birliklarida);

Pickett (Pickett W.E Iranian Jour. Of Phys. Res. 6, 29 (2006)) ishida  $\partial T_c / \partial p_a = -2$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 2.2$  va  $\partial T_c / \partial p_c = 0.1$  (hammasi K/GPa birliklarida).

Yuqorida keltirilgan qiymatlardan ko'rinib turibdi-ki, natijalarimiz tajriba natijalarining bir nechtasiga sifat jihatdan yaxshi mos kelsa, bazilariga qiymat

jihatdan yaqin keladi, ayrimlariga esa umuman mos kelmaydi. Bu juda ajablanarli holat emas. Chunki YBCO kuprati bo'yicha olib brilgan tajriba natijalarining o'zi ham bir biriga umuman qarama-qarashi ma'lumotlarni bergan. Buni yuqorida keltirilgan natijalarning sonli qiymatlaridan ham ko'rish mumkin.

Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, tugunlararo bipolaronlar ideal Boze gazining Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi tamoyili prinsipial jihatdan YBCO kupratlarining o'ta'okazuvchanlik kritik haroratiga bir o'qli taranglik (bosim) ta'siri bo'yicha tajribalarni sifat jihatdan tushintirishga qodir.

## XULOSA

Bosim (taranglik) ta'siridagi kupratlarda polaron samarasi muhim ahamiyat kasb etishi aniqlandi. Jumladan, u quyidagi xulosalarda ko'rsatildi:

1. Kengaytirilgan Holstein-Hubbard modeli kupratlardagi polaron samaralarini tavsiflovchi modeldir. Ushbu model doirasida mis-kislorod ( $\text{CuO}_2$ ) tekisligida joylashgan zaryad tashuvchilar va apikal kislorod ionlari o'rtasidagi o'zaro ta'sirlarni samarali aks ettirish mumkinligi ko'rsatildi;

2. Kengaytirilgan Holstein-Hubbard modeli doirasida kupratlardagi zaryad tashuvchilar massasi panjara tuzilishiga bog'liqligi, jumladan uning bir o'qli taranglik (bosim) ga kuchli bog'liq ravishda o'zgarishi ko'rsatildi;

3. LSCO ya YBCO kupratlari kristall panjarasida, tugunlararo bipolaronlardan tashkil topgan ideal gaz Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi harorati ( $T_{BEK}$ ), bevosita bipolaronlar konsentratsiyasi va bilvosita bipolaron massasi yordamida aniqlanadi;

4. LSAO va STO tagliklarida o'stirilgan LSCO kuprat yupqa pardalarida tugunlararo bipolaronlar ideal gazining Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi harorati ( $T_{BEK}$ ) yupqa pardalarda panjara doimiylari va tarangliklari orqali aniqlanadi va uning ushbu yupqa pardalar uchun tajribada kuzatilgan o'ta'okazuvchanlik kritik harorati ( $T_c$ ) bilan o'zaro qoniqarli muvofiqligi aniqlandi;

5. Model doirasida  $\partial T_{BEK} / \partial \varepsilon_i$  ( $\partial T_{BEK} / \partial p_i$ ) bo'yicha olingan hisoblash natijalari eksperimental ma'lumotlar  $\partial T_c / \partial \varepsilon_i$  ( $\partial T_c / \partial p_i$ ) bilan solishtirildi va ular o'rtasidagi sifat va miqdoriy jihatdan mosliklar topildi;

6. Model doirasida olingan,  $T_{BEK}$  ning legirlash darajasi ( $x$ ) ga bog'liqligi, tajribada kuzatilgan  $T_c$  ning  $x$  ga bog'liqligiga o'xshash gumbazli shaklga ega ekanligi aniqlandi. Xususan, LSCO yupqa pardalarining "1/8" anomaliyasi  $T_c - x$  fazaviy diagrammasi qurildi;

7. LSAO tagligida o'stirilgan 500 Å qalinlikdagi  $\text{La}_{1.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CuO}_4$  kupratining yupqa pardasi uchun tajribada aniqlangan  $T_c = 39\text{ K}$  natija tasdiqlandi. Shuningdek, LSCO/LSAO va LSCO/STO tizimlari uchun turli legirlash darajalarida  $T_{BEK}$  ning nazariy hisoblangan qiymatlari va tajribada topilgan  $T_c$  qiymatlari o'rtasida moslik topildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ РъD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

---

**НУКУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИМЕНИ АЖИНИЯЗА**

**ЖАЛЕКЕШОВ АЗАМАТ САРСЕНГАЛИЕВИЧ**

**ПОЛЯРОННЫЙ ЭФФЕКТ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВАХ  
КУПРАТОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (НАПРЯЖЕНИЕМ)**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Фергана–2024**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером № B2022.2.PhD/FM724.**

Докторская диссертация выполнена в Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.ferpi.uz](http://www.ferpi.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

- Научный руководитель:** **Явидов Бахрам Янгибаевич**  
доктор физико-математических наук, доцент
- Официальные оппоненты:** **Расулов Акбарали Махамматович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор
- Джуманов Сафарали**  
доктор физико-математических наук,  
профессор
- Ведущая организация:** **Самаркандский государственный университет**

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 года в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 при Ферганского политехнического институте (Адрес: 150107. г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-12-06; факс: (+99873) 241-12-16; e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru) ).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ферганского политехнического института (регистрационный номер \_\_\_\_\_) (150107. г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-12-06).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.  
(Протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2024 г.).

**Н. Х. Юлдашев**  
председатель научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**Б.Ж. Ахмадалиев**  
ученый секретарь научного совета по присуждению  
ученых степеней, PhD ф.-м.н.,

**С.М. Отажонов**  
председатель научного семинара  
при научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и необходимость темы диссертации.** Разработка новых способов совершенствования существующих в мире традиционных источников энергии, переход к эксплуатации на основе энергоэффективных и экологически чистых технологий является одной из наиболее актуальных проблем человечества. В связи с этим от проводящих веществ, обладающих свойством снижать электрическое сопротивление, в частности, соединений, принадлежащих к ряду высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), открытых Беднорцем и Мюллером в 1986 г. (Bednorz J and Muller K, Z. Phy. В (СМ) 64,189(1986)), не стоит ожидать многого. ВТСП представляют собой оксидно-медные соединения (купраты). Эксперименты показывают, что при высоком давлении критическая температура купратов может быть значительно повышена. В настоящее время подтверждено, что соединение купратов Hg-1223 переходит в состояние проводимости при температуре  $T_c = 164$  К под давлением выше 30 ГПа (Gao et al., Phys.Rev. В 50, 4260 (1994)). В то же время пленки купратов, выращенные на некоторых подложках, имеют более высокую критическую температуру проводимости по сравнению с объемными образцами (Naito et al., Physica C 546, 84 (2018)). В результате начала развиваться технология производства сверхпроводящих кабелей второго поколения с пленками ВТСП (А. Гоаля. Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников 2009. С. 432).

Ученые ведущих научно-исследовательских институтов мира проводят научные исследования способов повышения критической температуры высокотемпературной проводимости. Особенностью купратных пленок является то, что рисунок шторы находится под действием давления (напряжением). По этой причине изучение проводимости купратов под действием давления (напряжением) является одной из актуальных задач современной физики конденсированного состояния. Существует несколько теоретических исследований проводимости купратов под давлением (Chen et al., Phys. Rev. В 61, 3691 (2000), Lin et al., Physica C 341, 445 (2000)). Однако не учитывались основные особенности купратов, сильное электрон-фононное взаимодействие в купратах, поляронная природа носителя заряда и сильное влияние на полости плоскости  $\text{CuO}_2$  колебаний апикальных ионов кислорода. в этих работах. Более того, предсказание того, что проводимость при комнатной температуре может наблюдаться в мембраноподобных двумерных (слоистых) областях купрата под давлением (напряжением) (Dzhumanov et al., Func. Mat. 29, 475 (2022)) на одном С другой стороны, это исследование показывает, насколько актуальна проблема исследования, с другой стороны, это исследование показывает, что есть необходимость в его выполнении.

В нашей республике реализуются комплексные мероприятия, направленные на изучение физических свойств высокотемпературных проводящих веществ, создание перспективных методов создания энергоэффективных материалов и достигаются определенные результаты. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены

конкретные задачи по «... бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы жизни, увеличение энергоэффективности...»<sup>2</sup> сломанный. В реализации этих задач важна разработка новых методов совершенствования существующих традиционных источников энергии, создание дешёвых, высоконадёжных, экологически чистых и безопасных альтернатив.

Указ Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2017 года № УП-4958 «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования», 29 октября 2020 года № УП-6097 «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года», в постановление от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики», а также в других нормативных правовых документах, связанных с этой деятельностью, служат в той или иной степени.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

**Степень изученности проблемы.** Многие ученые мира изучали проблему проводимости в купратах экспериментально и теоретически. В том числе: В частности, она изучалась в работах зарубежных ученых С. Chen (Китай), H.Q. Lin (Китай), Y. Jiang (Сингапур), L. Chen (США), S.A. Trugman (США), Ming Lei (США), A.R. Bishop (США), L.Liu (США), H.Ledbetter (США), G.Calestani (Италия), C.Rizzoli (Италия), H.Yamamoto (Япония), M.Naito (Япония), H.Sato (Япония), J. Bonča (Словения), Bussmann-Holder (Германия), M. Zoli (Германия), G.L. Goodvin (Канада), M. Berciu (Канада), A.S. Alexandrov (Англия), P.E. Kornilovitch (Англия), X.J. Chen (Швейцария), R. Hasanov (Швейцария). В нашей ре свойства проводимости в купратах. В нашей стране такие ученые, как С. Джуманов, Б. Явидов, П.Ж. Байматов, Б. Абдуллаев, Б. Наримбетов, Д. Гуламова, Д. Джураев, У. Курбанов, О. Ганиев, Э. Каримбаев проводят исследования различных свойств проводимости в купратах.

На сегодняшний день существует несколько теоретических моделей ВТСП. К ним относятся экситонная модель Гинзбурга, модель Хаббарда, модель Хольстейна-Хаббарда, расширенная модель t-J и др. Многие экспериментальные данные показывают, что электрон-фононное взаимодействие в купратах ВТСП сильнее, чем в других взаимодействиях, а носителями заряда являются (би)поляроны. Учитывая это, возникает необходимость теоретического объяснения полученных экспериментальных результатов на основе поляронного подхода.

---

<sup>2</sup>Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 « О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы».

**Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Проведено в рамках планов по обеспечению реализации Указа Президента Республики Узбекистан № ПФ-6097 от 29.10.2020 г. «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года».

**Целью исследования.**  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  купратов заключается в определении законов зависимости критической температуры проводимости- $T_c$  от одноосной напряженности решетки (давления) и степени легирования.

**Задачи исследования:** Для достижения цели были выбраны следующие задачи:

расчет зависимости массы полярона от параметров кристалла, в частности одноосного напряжения и уровня легирования, в купратах  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  с системой сильного электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ);

Изучить влияние поверхностного одноосного напряжения на  $T_c$  в тонкой пленке  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ;

Изучить зависимость  $T_c$  от уровня легирования для тонких пленок, выращенных на подложках  $\text{LaSrAlO}_4$  и  $\text{SrTiO}_3$ ;

Расчет производных значений  $T_c$  для  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  по одноосному давлению и одноосному напряжению;

Изучить (рассчитать) зависимость  $T_c$  от одноосного напряжения для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ;

Расчет производных одноосного напряжения и одноосного давления от  $T_c$  для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

**Объектами исследования.** Сильно взаимодействующая электрон-фононная система, полярон, биполярон, купраты  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

**Предметом исследования.** Электрон-фононное взаимодействие (ЭФВ), масса носителей заряда (полярона), эффект одноосного напряжения, эффект одноосного давления, бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) биполяронов, проводимость.

**Методы исследования.** На основе поставленных задач с использованием расширенной модели Холстейна-Хаббарда, метода двойного квантования, биполярного подхода к проводимости и методов численного расчета рассчитана зависимость массы полярона и критической температуры проводимости в купратах от одноосного напряжения и уровень легирования.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

предложена теоретическая модель, описывающая влияние одноосного напряжения (давления) на проводимость сверхпроводимости  $T_c$  образцов купратов  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  разного уровня легирования;

впервые дано объяснение изменения масс поляронов в тонкой пленке  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и кристаллической структуре  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  под действием одноосного растяжения. В частности, объяснены уменьшение (увеличение) массы поляронов под действием сжимающих напряжений вдоль оси  $a(c)$  и увеличение (уменьшение) массы поляронов под действием растягивающих напряжений;

впервые получена фазовая диаграмма  $T_c \sim x$ , представляющая зависимость критической температуры проводимости от уровня легирования, отражающая аномалию «1/8» тонких пленок  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ;

производные значения проводимости  $T_c$  для  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  при разных степенях легирования по одноосному растяжению и одноосному давлению изменяются в зависимости от значения упругих постоянных;

величина проводимости купрата  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$   $T_c$  изменяется при одноосном растяжении. Производные значения проницаемости  $T_c$  для одноосного растяжения и одноосного давления изменяются в зависимости от значения упругих постоянных.

**Практические результаты исследования** заключается в следующем:

Массы поляронов в тонкой пленке  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  были определены для нескольких уровней легирования;

Исследована зависимость массы полярона в купрате  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  от напряжения;

Был разработан теоретический подход для объяснения значений  $T_c$  для купрата  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и тонкой пленки  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  в рамках модели Холстейна-Хаббарда;

Производные  $T_c$  для одноосного давления и одноосного напряжения объяснены для купратов  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

**Достоверность результатов исследования.** Используя проверенные на практике современные методы теоретической физики конденсированного состояния, в том числе с использованием расширенной модели Холстейна-Хаббарда, теоретически полученные выводы подтверждаются соответствием  $T_c(T_{БК})$  основным законам одноосного напряжения и степени легирования. А также соответствие результатов расчета экспериментальным данным с использованием проверенных современных методов теоретической физики.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они будут полезны при разработке микроскопической теории критической температуры купратов. Купраты изменяют значение критической температуры проводимости в зависимости от изменения массы полярона. Это осуществляется путем изменения расстояния (апикального расстояния) между медью в медно-кислородной плоскости и кислородом, расположенным над ней. Эти купраты определяются их потенциальным применением в улучшении

теоретических знаний о кристаллической структуре и структурно-зависимых физических свойствах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они могут быть использованы в развитии практического материаловедения, при изучении кристаллической структуры и при изучении того, как изменяется значение критической температуры проводимости под действием внешнего одноосного растяжения.

**Внедрения результатов исследования.** По результатам научных исследований данной диссертационной работы:

Образцы купратов  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  различной степени легирования в рамках теоретической модели, описывающей влияние одноосного растяжения (давления) на проводимость  $T_c$ , расчета масс поляронов в купратах и получения фазовой диаграммы  $T_c \sim x$ , представляющей зависимость критической температуры проводимости на уровне легирования из научных и практических результатов Узбекистана. Программа фундаментальных научных исследований по теме «Электронная теория легированных ВТСП-купратов и ее применение для исследования формирования и разделения диэлектрических/металлических и проводящих фаз на наномасштабе» проводится в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан в период 2020-2024 гг (исходный номер 2/1255-1397 АН Республики Узбекистан от 25 июня 2023 года). Использование этих научных результатов позволило разработать микроскопическую теорию высокотемпературной проводимости купратов, улучшить энергию автолокализованных электронов (или дырок), массу автолокализованных электронов (или дырок) и критическую температуру проводимости образцов купратов;

Из научных результатов расчета изменения проводимости  $T$  образцов купратов  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  разной степени легирования под действием внешнего одноосного растяжения в 2021-2023 годах «Производство керамики Vi- ВТСП с высокими критическими параметрами» в Казахстане Научно-исследовательский аграрный университет имени С.Сейфуллина был задействован в реализации научного проекта «Получение технологии» (справка №2775/1.2.1.11.1 от 25.09.2023 г. Казахского научно-исследовательского агротехнического университета имени С.Сейфуллина). Использование научных результатов диссертационной работы позволило улучшить критические параметры проводников, то есть за счет введения нанодисперсных магнитных и тугоплавких порошков для создания наночастиц штыря, критической плотности транспортного тока керамики ВТСП. Полученное в результате ИК-нагрева увеличение и прекращение накопления магнитных токов, а также внешние воздействия (давление) позволили понять механизм повышения критической температуры купратов.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 22 научных работы. В частности, опубликовано 7 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 1 из них опубликовано в Web of Science и 1 в журналах Scopus.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, списка опубликованных работ и приложений. Объем диссертации составляет 116 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность проведенных исследований. Дана совместимость с приоритетными направлениями развития науки и техники республики. Представлены степень изученности проблемы, цель и задачи исследования, научная новизна исследования, практические результаты. Краткая информация об утверждении научно-исследовательской работы и публикации результатов исследования, а также о структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации «**Высокотемпературные сверхпроводящие купраты**» дан обзор результатов, опубликованных в литературе. На основе анализа литературы сформулирован вопрос исследования.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Поляронный и биполяронный подходы к купратам**», представлены теории континуальных и решетчатых поляронов, расширенная модель Холстейна-Хаббарда и ее применение к купратам.

Купраты характеризуются как сильно связанная электронная (или дырочная) и сильно связанная электрон-фононная система. Такие системы удобно изучать в модели расширенной Хаббарда-расширенной Хольстейну. В модели полный гамильтониан системы записывается следующим образом:

$$H = H_e + H_{ph} + H_V + H_{e-ph} \quad . \quad (1)$$

Первый член представляет собой гамильтониан электронов и выражается следующим образом.

$$H_e = \sum_{n \neq n'} T(n - n') c_n^\dagger c_{n'}, \quad (2)$$

где  $T(n - n')$  – интеграл прыжков, описывающий прыжки электронов между  $n$ – и  $n'$ –соседними узлами,  $c_n^\dagger$  ( $c_n$ ) –  $n$  оператор рождения (уничтожения) электрона в узле. Второй член формулы 1 обозначает гамильтониан фононной системы и записывается как

$$H_{ph} = \sum_{q,\alpha} \hbar \omega_{q\alpha} \left( d_{q\alpha}^\dagger d_{q\alpha} + 1/2 \right), \quad (3)$$

где  $d_{q\alpha}^\dagger(d_{q\alpha})$  – рождение (аннигиляция)  $\alpha$  ( $\alpha = x, y, z$ ) – в этом выражении фононный оператор с поляризацией  $q$ , а волновой вектор  $\omega_{q\alpha}$  – частота фонона. Третий член формулы 1 записывается как

$$H_V = \sum_{n \neq n'} V_C(n - n') c_n^\dagger c_n c_{n'}^\dagger c_{n'} \quad (4)$$

$n$  и  $n'$  означает гамильтониан энергии взаимодействия электронов, находящихся в узлах решетки, через Кулоновские силы. Здесь  $V_C(n - n')$  –  $n$  и  $n'$  описывают кулоновскую потенциальную энергию двух электронов, находящихся в ячейках решетки. Четвертый член формулы 1 выражает гамильтониан электрон-фононного взаимодействия и записывается следующим образом.

$$H_{e-ph} = \sum_{nm\alpha} f_{m\alpha}(n) c_n^\dagger c_n \xi_{m\alpha}, \quad (5)$$

где  $f_{m\alpha}(n)$  –  $n$  сила связи «сдвига плотности» между электроном в узле  $n$  и  $n'$  ионом в узле  $m$ , а  $\xi_{m\alpha}$  – представляет нормальную координату колебаний иона в узле  $m$ . Его можно выразить оператором рождения и уничтожения фононов как

$$\xi_{m\alpha} = \sum_q \left( \sqrt{\frac{\hbar}{2NM\omega_{q\alpha}}} e^{iqm} d_{q\alpha}^\dagger + h.c. \right), \quad (6)$$

где  $N$  – количество узлов, а  $M$  – масса иона.

Расширенная модель Хаббарда, расширенная Хольстейном, позволяет учитывать электронные корреляции и дальнедействующие свойства электрон-фононного взаимодействия. В то время как гамильтониан модели в формуле 1 позволяет исследовать образование поляронов и биполяронов в дискретной решетке, для простоты оценки массы полярона мы проводим расчеты для фононов без уравнения 3 и дисперсии.

В рамках модели масса полярона в купратах рассчитывается по формуле

$$m_p = m^* e^{g^2}. \quad (7)$$

В этом случае  $m^*$  – эффективная масса носителя заряда,  $g^2$  – называется коэффициентом перенормировки массы и рассчитывается по следующей формуле

$$g^2 = \gamma \frac{E_p}{\hbar\omega}, \quad (8)$$

Здесь  $\gamma$  – коэффициент, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_m f_m(n) f_m(n+a)}{\sum_m f_m^2(n)}, \quad (9)$$

энергия полярона

$$E_p = \frac{1}{2M\omega^2} \sum_m f_m^2(n) \quad (10)$$

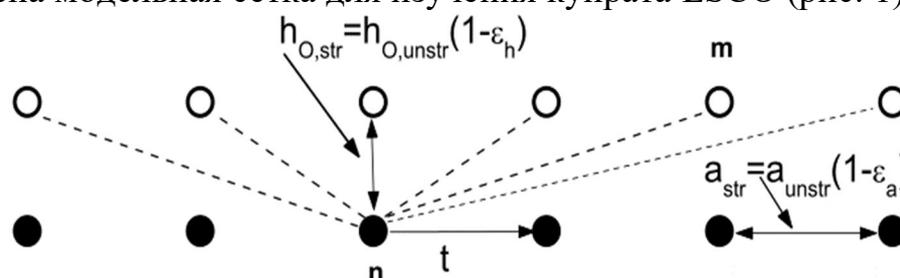
рассчитывается по этой формуле. Его значение выбрано так, чтобы  $T_c = T_{БЭК}$  при отсутствии напряжения и  $\hbar\omega = 0.075$  эВ.  $M$ - представляет собой массу апиальных ионов кислорода и рассчитывается по следующей формуле

$$f_m(n) = \frac{\kappa h_o(1 - \varepsilon_h)}{[|(n - m)(1 - \varepsilon_a)|^2 + (h_o(1 - \varepsilon_h))^2]^{3/2}}, \quad (11)$$

где  $\kappa$  – коэффициент,  $|n - m|$  – расстояние, измеряемое в единицах постоянной решетки,  $h_o$  – расстояние между медью и апиальными ионами кислорода,  $\varepsilon_a = (a_{unstr} - a_{str}) / a_{unstr}$  и  $\varepsilon_h = (h_{o,unstr} - h_{o,str}) / h_{o,unstr}$  рассчитываются по формулам и характеризуют напряжение оси  $a$ - и  $c$ - соответственно.

$$m_{ab} = m_p / \gamma_m^{(1/3)} \quad (12)$$

формула используется для расчета массы полярона в плоскости. Ниже представлена модельная сетка для изучения купрата LSCO (рис. 1).



**Рис. 1. Предлагаемая модель решетки для изучения купрата LSCO. Электрон прыгает в одномерной цепочке ионов (нижняя цепочка - черные кружки) и взаимодействует со всеми ионами высшей цепочки (верхняя цепочка - светлые кружки) через силу сдвига плотности.**

Теперь представим результаты, полученные путем применения приведенных выше формул к рисунку 1 (таблица 1).

**Таблица 1.**

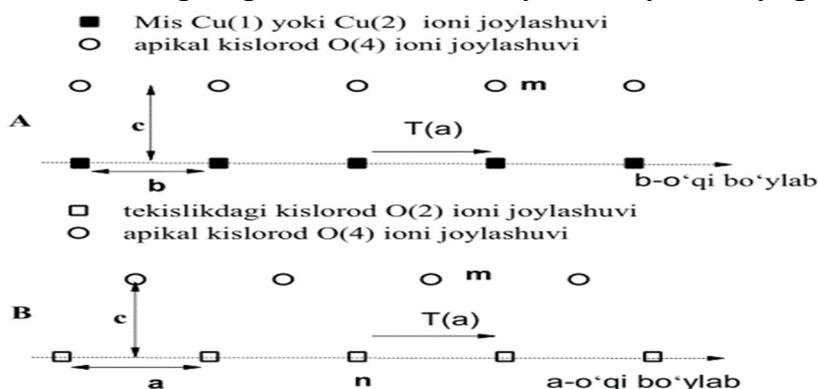
Расчетные значения энергии полярона, коэффициента гамма-числа, объемной и плоскостной масс полярона для нескольких уровней легирования Sr для случая тонкой пленки купрата LSCO толщиной 500 Å, выращенной на подложках (LSAO) и (STO). Значения напряжения по оси  $a$  занавески Naito и др. (Получено из Naito et al., Physica C 546, 84 (2018)). Значения напряжения вдоль оси  $c$  были рассчитаны в соответствии с корреляцией между толщиной 2000 Å LSCO в работе Сато Х. и Найто М. (Sato H and Naito M Physica C 274, 221(1997)).

$x$		0.0750	0.1000	0.1125	0.1250	0.1375	0.1500	0.2000	0.2500
$\varepsilon_a, \%$	LSAO	0.8750	0.7500	0.7230	0.6600	0.6150	0.5700	0.4400	0.3200
	STO	-3.0600	-3.1900	-3.2350	-3.2800	-3.3250	-3.3700	-3.5100	-3.6300
$\varepsilon_c, \%$	LSAO	-1.0259	-1.0300	-0.9525	-0.9531	-0.8309	-0.9273	-1.0766	-1.4346
	STO	0.7650	0.7975	0.8087	0.8200	0.8312	0.8425	0.8775	0.9075
$E_p, eV$	LSAO	0.4731	0.3991	0.4001	0.4105	0.3819	0.3740	0.3947	0.4916
	STO	0.5379	0.4549	0.4538	0.4660	0.4301	0.4246	0.4543	0.5825
$\gamma$	LSAO	0.6767	0.6784	0.6785	0.6788	0.6805	0.6789	0.6782	0.6757
	STO	0.7219	0.7239	0.7234	0.7237	0.7240	0.7237	0.7252	0.7273

$m_{ab}, m_e$	LSAO	13.1483	6.8073	6.8732	7.5627	5.8899	5.4407	6.5356	15.4496
	STO	32.5717	14.8700	14.6617	16.5292	11.7015	11.0831	14.8963	52.2740
$m_p, m_e$	LSAO	71.3800	36.9558	37.3137	41.0568	31.9756	295370	35.4808	83.8734
	STO	176.826	80.7268	79.5959	89.7343	63.5253	60.1682	80.8696	283.789

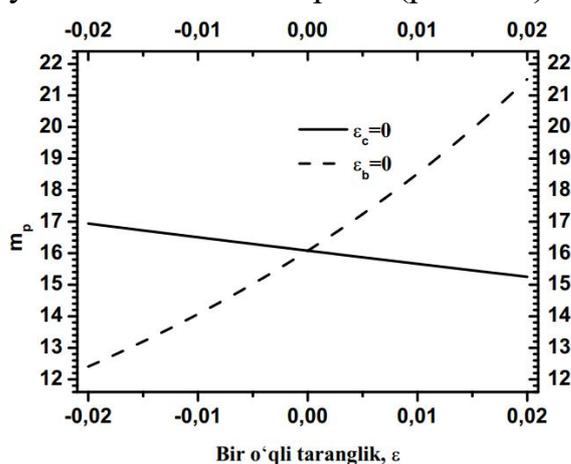
Как показано в таблице 1, тонкая пленка LSCO, выращенная на подложке LSAO, подвергается сжимающему напряжению вдоль оси  $a$ , тогда как тонкая пленка LSCO, выращенная на подложке STO, подвергается растягивающему напряжению. Более того, масса полярона тонкой пленки LSCO, выращенной на подложке STO, намного выше, чем масса полярона тонкой пленки LSCO, выращенной на подложке LSAO. Теоретические результаты для пленки LSCO ( $x = 0,15$ ) согласуются с данными Post и др. (Post K et al., Phys. Rev. B. 103, 134515 (2021)) для LSCO ( $x = 0,16$ )  $4.9 \pm 0.8 m_e$ .

Теперь приведем модельную сетку для купрата YBCO (рис. 2).

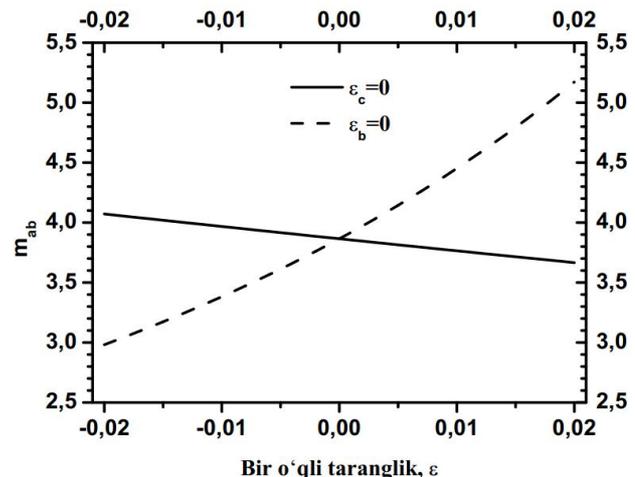


**Рис. 2.** Предлагаемая модель решетки для изучения купрата YBCO. На рисунке А показана слоистая структура вдоль оси  $b$ , а на рисунке В показана цепочечная структура вдоль оси  $a$ .

Применяя приведенные выше формулы к решеточной модели, предложенной для исследования купрата YBCO, мы получаем следующие графики путем изучения массы полярона (рис. 3-4).



**Рис. 3.** Зависимость изменения массы объемного полярона в купрате YBCO от одноосной напряжения вдоль осей  $b$  и  $c$ . Изменение массы дано в единицах  $m_e$



**Рис. 4.** Зависимость изменения массы полярона в плоскости от одноосной напряжения вдоль осей  $b$  и  $c$  в купрате YBCO. Изменение массы дано в единицах  $m_e$ .

Фигуры 3-4 соответствуют фигуре 2-А (складчатая конструкция). Как видно из рисунков 3 и 4, масса полярона уменьшается (увеличивается) в результате сжимающего (растягивающего) растяжения по оси  $b$  и увеличивается (уменьшается) под действием сжимающего (растягающего) растяжения по оси  $c$ . В этом случае, когда напряжение равно нулю,  $E_p = 0.418$  эВ, а числовой коэффициент равен  $\gamma = 0.498$ .

Теперь для цепной структуры на рис. 2-б мы получаем следующие графики, выполняя это исследование (рис. 5-6).

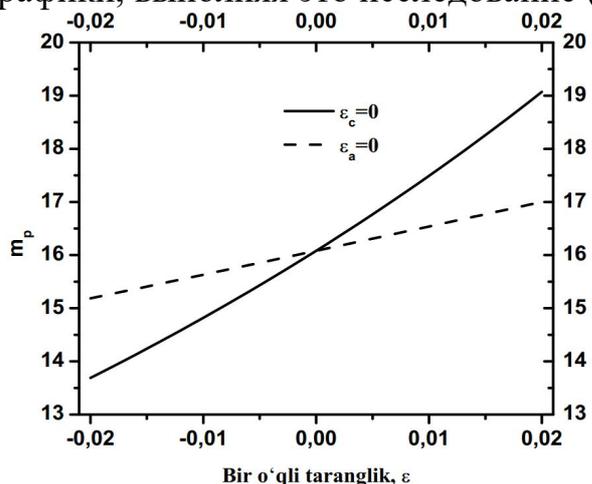


Рис. 5. Зависимость изменения массы объемного полярона в купрате YBCO от одноосной напряжения вдоль осей  $a$ - и  $c$ - . Изменение массы дано в единицах  $m_e$ .

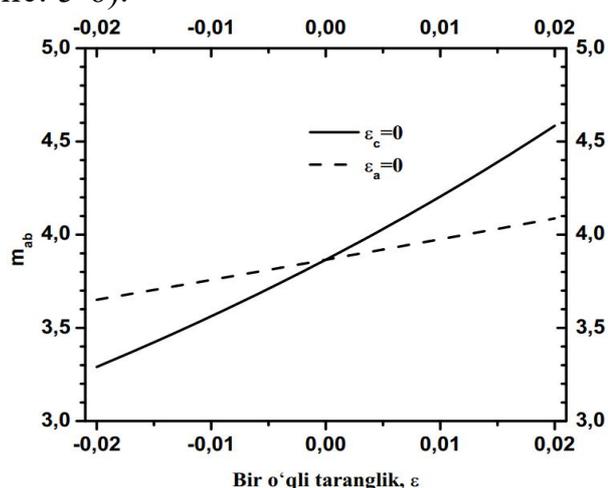


Рис. 6. Зависимость изменения массы полярона в плоскости от одноосной напряжения вдоль осей  $a$ - и  $c$ - в купрате YBCO. Изменение массы дано в единицах  $m_e$ .

В этом случае при напряжении, равном нулю,  $E_p = 0.497$  эВ, а числовой коэффициент равен  $\gamma = 0.419$ . Для обеих структур масса полярона при нулевом натяжении составляет  $m_p = 16.07 m_e$ , а масса полярона в плоскости составляет  $m_{ab} = 3.865 m_e$ .

В третьей главе диссертации «La - на основе купратов под действием давления (напряжение)» в рамках модели утверждается следующее:

объяснено изменение критической температуры пропускания тонкой пленки купрата LSCO, выращенной на подложках LSAO и STO, в зависимости от одноосной напряжения и уровня легирования;

объяснение фазовой диаграммы тонкой пленки купрата LSCO;

представлены результаты исследования производных одноосного напряжения и одноосного давления от критической температуры проводимости купрата LSCO.

Мы предположили, что межузельные биполярны образуют идеальный бозе-газ, и связали напряжение с температурой конденсации Бозе-Эйнштейна следующей формулой:

$$T_{БЭК} = \frac{3.31 \hbar^2 n^{2/3}}{2k_B m^*} e^{-g^2}. \quad (13)$$

Здесь  $\hbar$  – постоянная Планка,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $n$  – плотность межузловых биполяронов.

Напряжение влияет на  $T_{БЭК}$  через  $g^2$  и  $n$ . Исходный объем образца изменяется под действием напряжения. В результате плотность биполяронов рассчитывается по следующей формуле (Jalekeshov et al., Physica C 2023. 604. 1354177)

$$n = n_0(1 - \varepsilon_a)(1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_{ho}) \quad (14)$$

В этих расчетах использованы следующие экспериментальные данные для купратов: масса апиального иона кислорода  $M = 16 \text{ m. a. b}$  ( $2.6565032 \cdot 10^{-26}$ ) кг, начальная плотность межузловых биполяронов  $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ sm}^{-3}$ . Численные значения  $T_{БЭК}$ , рассчитанные по формуле 13, представлены в таблице 2 (Jalekeshov et al., Jornal Superconductivity and Novel magnetism-2022. - No. 12 - vol. 35. - pp. 3529-3536).

Таблица 2.

Теоретически рассчитанные экспериментальные значения и для случая пленки LSCO толщиной 500 Å, выращенной на подложках LSAO и STO.

$x$		0.0750	0.1000	0.1125	0.1375	0.1500	0.2000	0.2500	0.2500
$T_{БЭК}$ , К	LSAO	20.465	39.459	39.106	35.510	45.640	49.9031	40.903	17.1950
	STO	8.0370	17.5829	17.8254	15.8049	22.3165	23.552	17.500	4.9800
$T_c$ , К	LSAO	26.0	39.0	39.5	40.5	42.4	44.5	35.0	31.7
	STO	8.0	19.0	18.7	19.0	21.0	23.0	16.0	0

Для удобства сравнения экспериментальных данных и теоретических результатов они были размещены на одном графике (рис. 7).

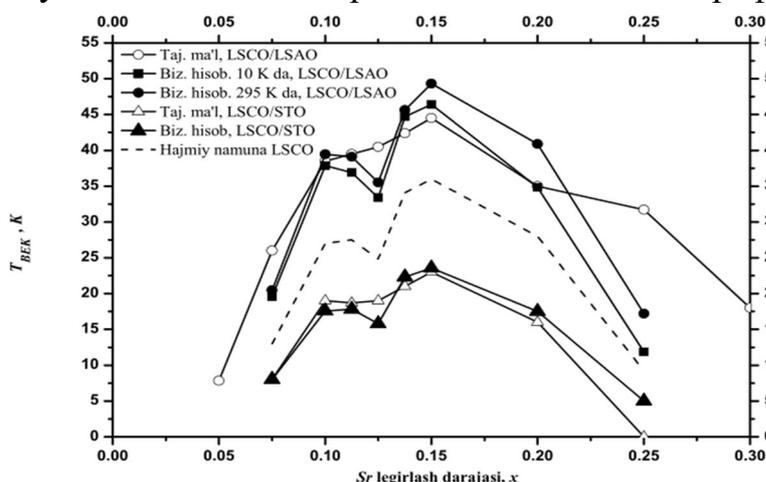


Рис. 7. Фазовая диаграмма критической температуры пропускания в зависимости от уровня легирования Sr ( $x$ ) для объемного образца купрата LSCO и тонкой пленки купрата. Представлены экспериментальные результаты и результаты теоретических расчетов.

Как видно из табл. 2 и рис. 7,  $T_c$  ( $T_{БЭК}$ ) пленки LSCO, выращенной на подложке LSAO (STO), больше (меньше) по сравнению с объемным образцом. Как видно, теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными. Кроме того, результаты, полученные в рамках нашей модели, отражают аномалию «1/8», которая, как говорят, наблюдается в купратах. Это можно отметить как достижение модели.

Теперь изучим влияние одноосного напряжения на  $T_{БЭК}$  по формуле 13 (рис. 8).

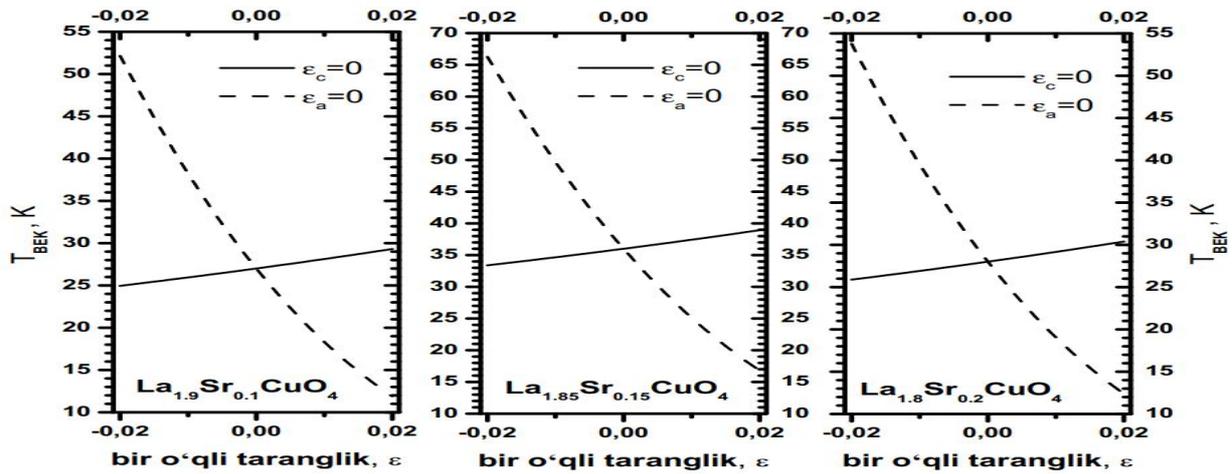


Рис. 8. Купрат LSCO межузловых биполярнонов  $T_{БЭК}$  как функция одноосных напряжений ( $\epsilon_a$  и  $\epsilon_c$ ). Они упорядочены слева направо в соответствии с уровнями легирования  $x = 0,1; 0,15; 0,2$ .

В соответствии с уровнями легирования  $x = 0.1; 0.15; 0.2$  выбираются значения, равные  $E_p = 0.430, 0.427, 0.400$  эВ, так что критическая температура проводимости недеформированного образца составляет  $T_{БЭК} = T_c = 27, 36, 28$  К. Используя исследование, представленное на рисунке 8, мы изучаем значения производной одноосной напряжении ( $\partial T_{БЭК} / \partial \epsilon_i$ )  $T_{БЭК}$ . Мы наносим расчетные теоретические значения  $\partial T_{БЭК} / \partial \epsilon_i$  для разных уровней легирования ( $x = 0,1; 0,15; 0,2$ ) на один график, чтобы сравнить их с литературными результатами (рис. 9).

Фигуры, соединенные сплошными линиями на рисунке 9, представляют собой экспериментальные результаты, а фигуры, соединенные кольцевыми линиями, представляют собой теоретические результаты, и между ними существуют следующие соотношения: закрашенные прямоугольники (■)  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \epsilon_a$  обозначают, закрашенные кружки (●)  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \epsilon_b$  обозначают, закрашенные треугольники (▲)  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \epsilon_c$  обозначают, для эксперимента Гугенбергер и др. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) сообщают о результатах; закрашенные треугольники, направленные влево (◀)  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \epsilon_{ab}$  описывают, закрашенные треугольники, направленные вправо (▶)  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial \epsilon_c$  описывают Нохара и др. (Nohara et al., Phys. Rev. B 52, 570 (1995)) сообщают о результатах; незакрашенные кружки (○)  $\leftrightarrow \partial T_{БЭК} / \partial \epsilon_a$  и незакрашенные треугольники (△)  $\leftrightarrow \partial T_{БЭК} / \partial \epsilon_c$  описывают наши результаты.

Как видно из результатов на рис. 9, результаты теоретических расчетов качественно хорошо согласуются с экспериментальными результатами, а при некоторых уровнях легирования имеют отличное стоимостное совпадение. Одноосные производные давления от  $T_{БЭК}$  можно изучать с помощью одноосных производных напряжении. Производные одноосного давления ( $\partial T_{БЭК} / \partial p_i$ ) рассчитываются путем решения системы уравнений ниже

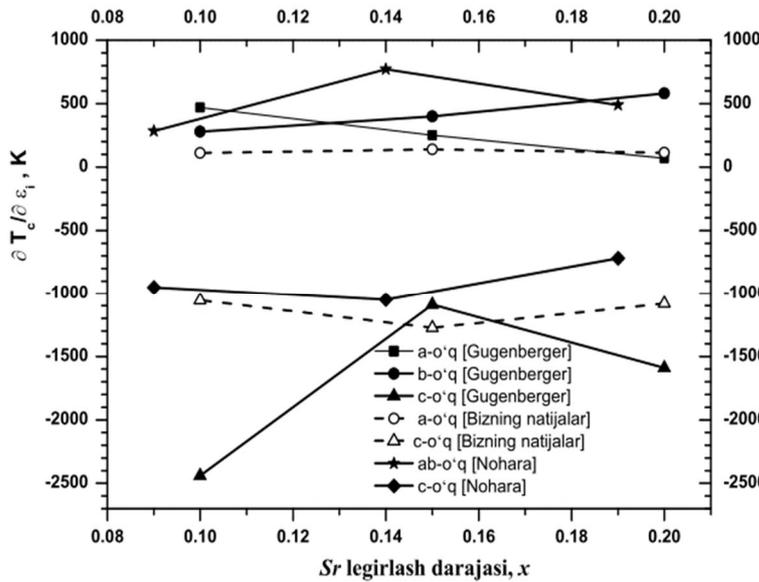


Рис. 9. Производные значения купрата  $T_c$  LSCO по отношению к одноосной напряжению. Он представлен для нескольких значений уровня легирования Sr. Результаты теоретических расчетов представлены на одном графике с результатами, полученными из литературы, для сравнения.

$$\frac{\partial T_{БК}}{\partial \varepsilon_i} = \sum_j C_{ij} \frac{\partial T_{БК}}{\partial p_j}. \quad (15)$$

Значения  $\partial T_{БК}/\partial p_i$  зависят от источника  $C_{ij}$ . Это связано с тем, что в разных источниках приводится разная информация о числовых значениях  $C_{ij}$ . В недавней работе нам не удалось найти полный набор  $C_{ij}$ , предоставленный LSCO, для необходимых нам уровней легирования. По этой причине мы сочли целесообразным использовать информацию из теоретических работ. Для уровней легирования  $x = 0.1$  и  $x = 0.15$  Сингх и др. (Singh et al., Physica C 419, 1 (2005)), для уровней легирования  $x = 0.2$  Жаячандран и др. (Jayachandran K and Menon C Physica C. 454, 27 (2007)) мы использовали значения  $C_{ij}$ .

Теоретически рассчитанные значения  $\partial T_{БК}/\partial p_i$  с использованием формулы 15 и экспериментально определенные значения  $\partial T_c/\partial p_i$  размещены на одном изображении для удобства сравнения (рис. 10).

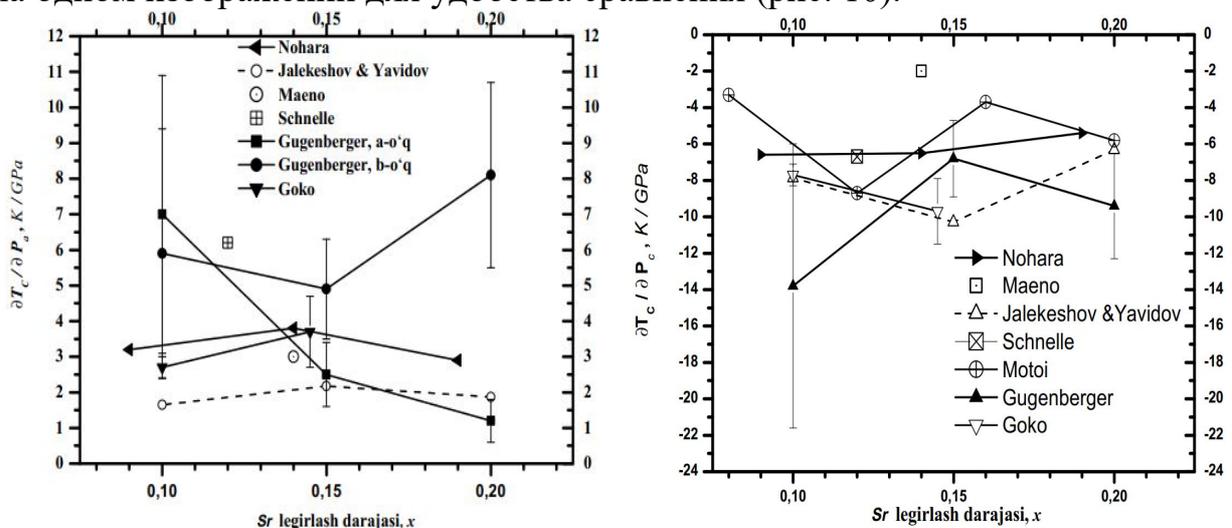


Рис. 10. Значения  $\partial T_c / \partial p_i$  ( $i = a, b, c$ ) купрата LSCO. По оси  $a, b$  слева, по оси  $c$  справа. Уровни легирования - результаты теоретических расчетов и экспериментальные результаты для нескольких значений  $x$  представлены на одном рисунке.

Фигуры, соединенные сплошными линиями, и отдельно стоящие фигуры на рисунке 10 представляют экспериментальные результаты, а фигуры, соединенные пунктирными линиями, представляют собой теоретические результаты, и между ними существуют следующие отношения: закрашенные прямоугольники ( $\blacksquare$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_a$ , закрашенные кружки ( $\bullet$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_b$  и закрашенные треугольники описывают ( $\blacktriangle$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$ , результаты Гугенбергера и др. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)); описание закрашенных треугольников, направленных влево ( $\blacktriangleleft$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$ , закрашенных треугольников, направленных вправо ( $\blacktriangleright$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$ , результаты Нохара и др. (Nohara et al., Phys. Rev. B 52, 570 (1995)); кружки со знаком + обозначают ( $\oplus$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  Мотои и др. (Motoi et al., J. Phys. Soc. Japan. 60, 384 (1991)), прямоугольники со знаком + представляют ( $\boxplus$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$ , прямоугольники со знаком  $x$  описывают ( $\boxtimes$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$ , результаты Счнелле и др. (Schnelle et al., Phys. And Mat. Scien. Of HTS, II 1992, 151); кружки с точкой в центре описывают ( $\odot$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$ , а прямоугольники с точкой в центре описывают ( $\boxdot$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  результаты Маэно и др. (Maeno et al., Springer Japan 103, (1994)); закрашенные нисходящие треугольники описывают ( $\blacktriangledown$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_{ab}$ , незакрашенные нисходящие треугольники описывают ( $\nabla$ )  $\leftrightarrow \partial T_c / \partial p_c$  результаты Гоко и др. (Goko et al., Jour. of the Phys. Soc. Japan 68, 3074 (1999)); незакрашенные кружки описывают ( $\circ$ )  $\leftrightarrow \partial T_{БК} / \partial p_a$ , а незакрашенные треугольники описывают ( $\Delta$ )  $\leftrightarrow \partial T_{БК} / \partial p_c$ , и они обозначают наши (Jalekeshov A and Yavidov B, Physica C 64, 1354177 (2023)) результаты.

Из рисунка 10 видно, что наши результаты по оси  $\alpha$  качественно согласуются с литературными результатами, и, начиная с  $x = 0.15$ , Гугенбергер и др. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) лежит в пределах погрешности результатов. У него даже есть абсолютная совместимость в какой-то момент. Наши результаты по оси  $c$  также качественно согласуются с литературными данными. В диапазоне от  $x = 0.1$  до  $x = 0.145$  Гоко и др. (Goko et al., Jour. of the Phys. Soc. Japan 68, 3074 (1999)) очень близки к значениям и находятся в пределах ошибки. В этом интервале Гугенбергер и др. (Gugenberger et al., Phys. Rev. B 49, 13137(1994)) находится в пределах погрешности результатов работы. Кроме того, при  $x = 0.12$  Мотои и др. (Motoi et al., J. Phys. Soc. Japan. 60, 384 (1991)) имеет отличную совместимость с результатом. в то время как при  $x = 0.2$  результат Мотои и др. очень близок к результату. В то же время Гугенбергер и др. результаты работы находятся в пределах погрешности. Конечно, есть несоответствия наших теоретических исследований экспериментальным результатам. Мы полагаем, что это также связано с различным выбором значений  $C_{ij}$ . В частности, Гугенбергер и др. из значений  $C_{ij}$  не-SC (сверхпроводниковых)  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  для трех различных уровней легирования в своей работе Nohara et al.

пишет, что он рассчитал значения  $T/P$ , используя значения  $C_{ij}$ , соответствующие  $\text{La}_{1.86}\text{Sr}_{0.14}\text{CuO}_4$ , для всех трех различных уровней легирования. Ниже мы обсудим преимущества (причины совпадения с экспериментальными результатами) и недостатки (причины несоответствия) нашей модели для купрата LSCO. Сначала представляем достижения:

1. Используемая нами модель учитывает основные свойства купратов: сильное электрон-фононное взаимодействие, определяющее состояние и динамику носителей заряда (поляронов и биполяронов);

2. В нашей модели купраты рассматриваются как квазидвумерная структура. В этом случае динамика (би)поляронов определяется не только динамикой решетки ионов  $\text{CuO}_2$ -плоскости (т.е.  $ab$ -плоскости), но и колебаниями апикальных ионов кислорода вне  $ab$ -плоскости;

3. Он также способен учитывать решеточные напряжения в кристаллической структуре купратов, в частности, давления в тонкой пленке купрата, деформируемой во всех направлениях одновременно;

4. Как наблюдалось во многих экспериментах, наша модель дает большее (меньшее) значение объемной  $T_{БЭК}$  образца при сжатии (растяжении)  $ab$ -плоскости тонких купратных занавесок. То же самое происходит при растяжении (сжатии) оси с купратной мембраны.

Теперь попробуем объяснить расхождения:

1. Используя расширенную модель Холстейн-Хаббарда в режиме сильной связи и в неадиабатическом пределе, в реальных ситуациях купраты могут существовать в средних значениях электрон-фононной связи при определенных уровнях легирования, а также в промежуточных адиабатических режимах;

2. Выбор наиболее подходящей модели решетки. Это одномерно. Фактически необходимо учитывать трехмерную кристаллическую структуру LSCO;

3. Выбор электрон-фононного типа силы «сдвига плотности» в виде формулы (11) может привести к недооценке значения  $E_p$  в купратах типа ЭФВ Фрелиха;

4. При оценке массы (би)полярона в расширенной модели Холстейна не учитывается корреляционный эффект, важный для купратов;

5. Это связано с предположением, что биполяроны образуют идеальный газ (их температура бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) определяется по формуле 13). Как видно из результатов на рис. 7, такое предположение может быть справедливым в недо- и оптимально-допированных режимах, но занижает значения  $T_{БЭК}$  при высоких уровнях легирования.

Все вышеперечисленные соображения могут привести к несоответствиям. Помимо перечисленных теоретических соображений, также возможно измерение  $T_c$  в экспериментах разными методами. В литературе можно найти экспериментальные исследования, где  $T_c$  измеряют как

начальную температуру, среднюю температуру и температуру, равную 90% сопротивления, а также температуру нулевого сопротивления. Мы полагаем, что эти условия могут вызвать некоторые расхождения между нашим  $T_{БЭК}$  и экспериментальным  $T_c$ . Тем не менее, как видно из численных результатов, наша модель удовлетворительно объясняет значение  $T_c$  тонких пленок купрата LSCO, выращенных на подложках LSAO и STO. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что даже при таких скромных предположениях наша модель отражает фундаментальную физику тонкой пленки купрата LSCO.

В заключение главы подчеркивается, что поляронный эффект имеет большое значение для получения аномальной фазовой диаграммы «1/8» купрата LSCO и изучения критической температуры проводимости.

В четвертой главе диссертации под названием «Купраты на основе Y под действием давления (напряжения)» в рамках модели представлены результаты исследования изменения критической температуры проводимости объемного образца купрата YBCO под действием влияния одноосной напряженности и ее производных от одноосной напряженности и одноосного давления.

По формуле 13 изучено изменение купрата YBCO  $T_{БЭК}$  под действием одноосной напряженности. Как мы упоминали ранее, кристаллическая структура YBCO состоит из слоистой и цепочечной структуры. Сначала мы проводим исследования для слоистой структуры и представляем результат на рисунке 11.

На рисунке 11 показано изменение межузловых биполяронов  $T_{БЭК}$  вдоль оси  $b$   $\epsilon_b$  (сплошная линия) и  $\epsilon_c$  (длинная линия) вдоль оси  $c$  для решетки на рис. 2-А. Мы принимаем значение  $T_{БЭК}$  как  $T_c = 91$  К купрата YBCO с высокой  $T_c$  при  $\epsilon_i = 0$  ( $i=b,c$ ).

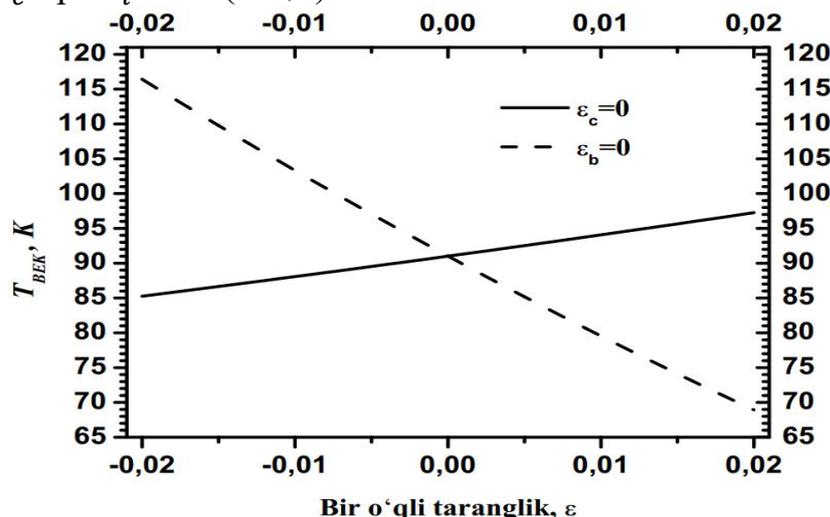


Рис. 11. Изменение  $T_{БЭК}$  купрата YBCO при одноосной напряженности. Для слоистой структуры на рис. 2-А.

Как видно из рис. 11, значение  $T_{БЭК}$  увеличивается (уменьшается) в результате сжатия вдоль оси  $b$  ( $c$ ). На самом деле так и должно быть. Как видно на рисунках 3-4, масса полярона уменьшается (увеличивается) в результате сжатия вдоль оси  $b$  ( $c$ ). Это приводит к увеличению  $T_{БЭК}$ . Потому что по мере уменьшения массы полярона он начинает легко двигаться. Масса полярона

увеличивается (уменьшается) в результате растяжения вдоль оси  $b$  ( $c$ ). В результате значение  $T_{БЭК}$  уменьшается (увеличивается). Причина в том, что увеличение массы снижает подвижность носителей заряда (поляронов).

Затем мы проведем те же исследования для цепной структуры. Это соответствует структуре, представленной на рисунке 2-В.

На рисунке 12 показано изменение межузловых биполяронов  $T_{БЭК}$  для решетки на рисунке 2-В в зависимости от напряжений  $\epsilon_a$  вдоль оси  $a$  (сплошная линия) и  $\epsilon_c$  (длинная линия) вдоль оси  $c$ . Мы принимаем значение  $T_{БЭК}$  как  $T_c = 91\text{K}$  купрата YBCO с высокой  $T_c$  при  $\epsilon_i = 0$  ( $i=b,c$ ).

Как видно из рис. 12, значение  $T_{БЭК}$  уменьшается (увеличивается) в результате сжатия (растяжения) вдоль оси  $a(c)$ . На рис. 5-6 видно, что масса полярона увеличивается (уменьшается) в результате сжатия (растяжения) вдоль оси  $a$  ( $c$ ). Это приводит к уменьшению (увеличению)  $T_{БЭК}$ . Причина в том, что увеличение (уменьшение) массы уменьшает (увеличивает) подвижность носителей заряда (поляронов).

Результаты исследования влияния одноосной напряжение на  $T_{БЭК}$  для слоистой структуры купрата YBCO качественно согласуются с результатами исследования влияния одноосной напряжение на  $T_{БЭК}$  для купрата LSCO. Это указывает на то, что модель может быть применена к купратам, отличным от купратов LSCO. Потому что разница между купратом YBCO и купратом LSCO заключается в том, что он имеет цепочечную структуру наряду со слоистой структурой. Кроме того, исследования в рамках модели согласуются с представленными в литературе результатами об изменении массы носителей заряда под действием напряжением и, как следствие, изменении  $T_c$ .

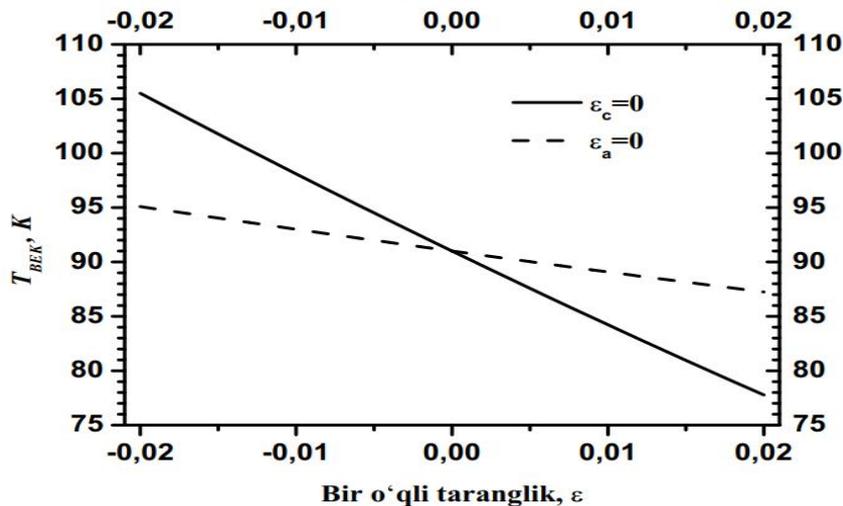


Рис. 12. Изменение  $T_{БЭК}$  купрата YBCO при одноосной напряжении. Для цепной структуры на рис.

Теперь, используя влияние одноосной напряжение на  $T_c$  купрата YBCO выше, мы изучаем значения  $\partial T_c / \partial \epsilon_i$ . По литературным данным значения  $\partial T_c / \partial \epsilon_i$  для купрата YBCO вдоль  $a$ - и  $b$ - кристаллографических осей имеют противоположные знаки:  $\partial T_c / \partial \epsilon_a < 0$  и  $\partial T_c / \partial \epsilon_b > 0$ . Значения  $\partial T_c / \partial \epsilon_c$  колеблются в широких пределах, но все они отрицательные.  $\partial T_{БЭК} / \partial \epsilon_b = +300\text{K}$  и  $\partial T_{БЭК} / \partial \epsilon_c = -1187\text{K}$  для случая на рис. 11 (слоистая структура на рис. 2-

А), и  $\partial T_{БЭК} / \partial \varepsilon_a = -693 K$  и  $\partial T_{БЭК} / \partial \varepsilon_c = -196 K$  (Jalekeshov A va Yavidov B. Fan va Jamiyat. 1, 12 (2023)) для случая на рис. 12 (структура цепи на рис. 2-Б) значений.

Мы вычисляем значения  $\partial T_{БЭК} / \partial p_i$  для купрата YBCO, решая приведенные выше значения  $\partial T_{БЭК} / \partial \varepsilon_i$  в системе уравнений 15. Из приведенных в литературе значений  $\partial T_c / \partial p_i$  для купрата YBCO видно, что результаты разных экспериментов дают разные значения. Это связано с тем, что они используют разные значения  $C_{ij}$  при решении системы уравнений 15. Мы также рассчитали несколько различных значений, используя значения  $C_{ij}$  из разной литературы в теоретических расчетах. Результаты расчета будут различаться в зависимости от выбора  $C_{ij}$ . Ниже мы (Jalekeshov A va Yavidov B. Fan va Jamiyat. 1, 12 (2023)) рассчитали результаты, используя четыре разных набора  $C_{ij}$ :

Лудвиг и др. (Ledbetter et al., J. of Mat. Res. 6, 2253 (1991)) используя значения  $C_{ij}$ ,  $\partial T_{БЭК} / \partial p_a = -3,851$ ,  $\partial T_{БЭК} / \partial p_b = 3,199$  и  $\partial T_{БЭК} / \partial p_c = -0,955$  (все в единицах К/ГПа);

Ледбеттер и др. (Ledbetter et al., J. of Mat. Res. 6, 2253 (1991)) используя значения  $C_{ij}$ , указанные как  $\partial T_{БЭК} / \partial p_a = -3,146$ ,  $\partial T_{БЭК} / \partial p_b = 1,984$  и  $\partial T_{БЭК} / \partial p_c = -0,728$  (все в единицах К/ГПа);

Лей и др. (Lei et al., Phys. Rev. B. 47, 6154 (1993)) используя значения  $C_{ij}$ , указанные как  $\partial T_{БЭК} / \partial p_a = -4.889$ ,  $\partial T_{БЭК} / \partial p_b = 3.955$  и  $\partial T_{БЭК} / \partial p_c = -1.207$  (все в единицах К/ГПа);

Реичардт и др. (Reichardt et al., Supercon. Sci. and Tech. 1, 173 (1988)) используя значения  $C_{ij}$ , указанные как  $\partial T_{БЭК} / \partial p_a = -4.153$ ,  $\partial T_{БЭК} / \partial p_b = 3.484$  и  $\partial T_{БЭК} / \partial p_c = -0.860$  (все в единицах К/ГПа);

Для сравнения теоретических результатов приведем также экспериментальные значения:

В работе Велп и др. (Welp et al., Phys. Rev. Lett. 69, 2130 (1992))  $\partial T_c / \partial p_a = -2 \pm 0,2$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 1,9 \pm 0,2$  и  $\partial T_c / \partial p_c = -0,3 \pm 0,1$  (все в единицах К/ГПа);

В работе Будко и др. (Bud'ko et al., Phys. Rev. B. 46, 1257 (1992))  $\partial T_c / \partial p_a = -3.06 \pm 0.35$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 0.38 \pm 0.18$  и  $\partial T_c / \partial p_c = 3.45 \pm 0.43$  (все в единицах К/ГПа);

В работе Меингаст и др. (Meingast et al., Phys. Rev. Lett. 67, 1634 (1991))  $\partial T_c / \partial p_a = -1.9$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 2.2$  и  $\partial T_c / \partial p_c = 0$  (все в единицах К/ГПа);

В работе Пиккет и др. (Pickett W.E Iranian Jour. Of Phys. Res. 6, 29 (2006))  $\partial T_c / \partial p_a = -2$ ,  $\partial T_c / \partial p_b = 2.2$  и  $\partial T_c / \partial p_c = 0.1$  (все в единицах К/ГПа).

Как видно из приведенных выше значений, наши результаты качественно совпадают с некоторыми экспериментальными результатами, некоторые близки по величине, а некоторые не совпадают вовсе. Это неудивительно. Потому что результаты эксперимента, проведенного на самом купрате YBCO, дали данные, совершенно противоположные друг другу. Это видно и из численных значений результатов, представленных выше.

Эти результаты показывают, что принцип бозе-эйнштейновской конденсации идеального бозе-газа межузловых биполярнов в принципе способен качественно объяснить эксперименты по влиянию одноосной напряженности (давления) на критическую температуру проводимости купратов YBCO.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что поляронный эффект важен в купратах под действием давления (напряжения). В частности, это проявилось в следующих выводах:

1. Расширенная модель Хольстейн-Хаббарда представляет собой модель, описывающую поляронные эффекты в купратах. В рамках этой модели было показано, что взаимодействия между носителями заряда, расположенными на медь-кислородной ( $\text{CuO}_2$ ) плоскости, и апикальными ионами кислорода могут эффективно отражаться;

2. В рамках расширенной модели Хольстейн-Хаббарда было показано, что масса носителей заряда в купратах зависит от структуры решетки, в том числе ее сильное изменение в зависимости от одноосного напряжения (давления);

3. В кристаллической решетке купратов LSCO или YBCO температура Бозе-Эйнштейновской конденсации ( $T_{\text{БЭК}}$ ) идеального газа, состоящего из межузловых биполярнов, определяется непосредственно концентрацией биполярнов и косвенно массой биполарона;

4. Температура Бозе-Эйнштейновской конденсации ( $T_{\text{БЭК}}$ ) идеального газа межузловых биполярнов в тонких пленках купратов LSCO, выращенных на подложках LSAO и STO, определяется постоянными решетки и натяжениями в тонких пленках и находится в удовлетворительном согласии с экспериментально наблюдаемыми значениями критической температуры ( $T_c$ ) пропускания для этих тонких пленок;

5. В рамках этой модели расчетные результаты  $\partial T_{\text{БЭК}}/\partial \varepsilon_i$  ( $\partial T_{\text{БЭК}}/\partial p_i$ ) сравнивались с экспериментальными данными  $\partial T_c/\partial \varepsilon_i$  ( $\partial T_c/\partial p_i$ ) и были найдены качественные и количественные соответствия между ними;

6. Установлено, что зависимость  $T_{\text{БЭК}}$  от уровня легирования ( $x$ ), полученная в рамках модели, имеет куполообразную форму, аналогичную зависимости  $T_c$  от  $x$ , наблюдаемой в эксперименте. В частности, построена фазовая диаграмма  $T_c \sim x$  тонких пленок LSCO с аномалией «1/8».

7. Подтвержден экспериментально полученный результат  $T_c = 39$  К для тонкой пленки купрата  $\text{La}_{1.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CuO}_4$  толщиной 500 Å, выращенной на подложке LSAO. Также для систем LSCO/LSAO и LSCO/STO обнаружено согласие между теоретически рассчитанными значениями  $T_{\text{БЭК}}$  и экспериментально найденными значениями  $T_c$  при разных уровнях легирования.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE FERGHANA POLYTECHNIC  
INSTITUTE**

---

**NUKUS STATE PEDAGOGICAL INSTITUTE NAMED AFTER AJINIYAZ**

**JALEKESHOV AZAMAT SARSENGALIEVICH**

**POLARONIC EFFECT IN THE SUPERCONDUCTING PROPERTIES OF  
THE CUPRATES UNDER PRESSURE (STRAIN)**

**01.04.07 – Condensed matter physics**

**DISSERTATION ABSTRACT  
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

**Ferghana – 2024**

**The theme of the doctor of philosophy (PhD) dissertation in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the No. B2022.2.PhD/FM724.**

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Nukus state pedagogical institute named after Ajiniyaz.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.ferpi.uz](http://www.ferpi.uz) and on the website of “Ziyonet” Information and Educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

<b>Scientific supervisor:</b>	<b>Yavidov Bakhram Yangibaevich</b> Doctor of Physical and Mathematical Sciences, docent
<b>Official opponents:</b>	<b>Rasulov Akbarali Maxamattovich</b> Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor <b>Dzhumanov Safarali</b> Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
<b>Leading organization:</b>	<b>Samarkhand State University</b>

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024, at \_\_\_ at the meeting of the Scientific Council No. PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Fergana polytechnic institute (Address: 150107, Ferghana street 86, Ferghana city. tel. (+99873) 241-12-06; fax (+99873) 241-12-06; e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the FerPI (registered under No. \_\_\_\_\_) Address: 150107, FerPI, Ferghana street 86, Ferghana city, tel. (+99873) 241-12-06.

The abstract of dissertation was distributed on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024.  
(Registry record No. \_\_\_ dated “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024.)

**N.Kh. Yuldashev**  
Chairman of the Scientific Council for Awarding  
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

**B.J. Axmadaliev**  
Scientific Secretary of the Scientific Council for Awarding  
Doctor of physical and mathematical sciences

**S.M. Otajonov**  
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees,  
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

## INTRODUCTION (annotation the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation)

**Relevance and necessity of the dissertation topic.** The development of new ways to improve the world's traditional energy sources, the transition to operation based on energy-efficient and environmentally friendly technologies is one of the most pressing problems of humanity. In this regard, conductive substances with the property of reducing electrical resistance, in particular, compounds belonging to the series of high-temperature superconductors (HTSC) discovered by Bednorz and Muller in 1986 (Bednorz J and Muller K, *Z. Phys. B (CM)* 64,189(1986)), do not expect much. HTSC are copper-oxide compounds (cuprates). Experiments show that under high pressure, the critical temperature of cuprates can be significantly increased. It has now been confirmed that the Hg-1223 compound of cuprates transitions to the conduction state at  $T_c = 164$  K under pressures above 30 GPa (Gao et al., *Phys.Rev. B* 50, 4260 (1994)). At the same time, cuprate films grown on some substrates have been found to have a higher critical conductivity temperature compared to bulk samples (Naito et al., *Physica C* 546, 84 (2018)). As a result, the production technology of second-generation superconducting cables with HTSC films began to develop (А. Голя. Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников 2009. С. 432).

Scientists from the world's leading research institutes are conducting scientific research into ways to increase the critical temperature of high-temperature conductivity. A special feature of cuprate films is that the current pattern is under the influence of strain (pressure). For this reason, the study of the conductivity of cuprates under the influence of pressure (strain) is one of the urgent problems of modern condensed state physics. There are several theoretical studies on the conductivity of cuprates under pressure (Chen et al., *Phys. Rev. B* 61, 3691(2000), Lin et al., *Physica C* 341, 445 (2000)). However, the main features of cuprates, the strong electron-phonon interaction in cuprates, the fact that the charge carrier has a polaronic nature and the cavities of the  $\text{CuO}_2$  plane are strongly affected by the vibrations of apical oxygen ions, were not taken into account in these works. Moreover, the prediction that room-temperature conductivity can be observed in membrane-like two-dimensional (layer) areas of cuprate under pressure (strain) (Dzhumanov et al., *Func. Mat.* 29, 475 (2022)) on the one hand shows how urgent the research problem is, on the other hand, this study shows that there is a need to perform it.

In our republic, comprehensive measures are being implemented aimed at studying the physical properties of high-temperature conductive substances, creating promising methods for creating energy-efficient materials, and certain results are being achieved. The development strategy of New Uzbekistan for 2022-2026 sets specific goals for "... uninterrupted supply of electricity to the economy, active implementation of Green Economy technologies in all spheres of life, increasing

energy efficiency...<sup>3</sup> broken. In implementing these tasks, it is important to develop new methods for improving existing traditional energy sources, creating cheap, highly reliable, environmentally friendly and safe alternatives

Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-4958 of February 16, 2017 “On further improvement of the system of postgraduate education”, No. UP-6097 October 29, 2020 “On approval of the concept of development of science until 2030”, in the resolution No. PP -5032 of March 19, 2021 “On measures to improve the quality of education and improve scientific research in the field of physics”, as well as in other regulatory legal documents related to this activity, serve to one degree or another.

**Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan.** The dissertation has been performed in accordance with the priority direction of the development of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. “Energy, energy saving and alternative energy sources”.

**Degree of study the problem.** Many scientists of the world studied the problem of conductivity in cuprates through experiments and theoretically. Including: foreign scientists C.Chen (China), H. Q.Lin (China), Y.Jiang (Singapore), L. Chen (USA), S.A. Trugman (USA), Ming Lei (USA), A.R. Bishop (USA), L. Liu (USA), H. Ledbetter (USA), G. Calestani (Italy), C. Rizzoli (Italy), H. Yamamoto (Japan), M. Naito (Japan), H. Sato (Japan), J. Bonča (Slovenia), Bussmann-Holder (Germany), M.Zoli (Germany), G.L. Goodwin (Canada), M.Berciu (Canada), A.S. Alexandrov (England), P.E. Kornilovitch (England), H.J.Chen (Switzerland), R. Khasanov (Switzerland) it was studied in the works of. In our country, scientists such as S. Djumanov, B. Yavidov, P.J. Baymatov, B.Abdullaev, B.Narimbetov, D. Gulamova, D. Djurayev, U. Kurbanov, O.Ganiev, E. Karimboev are conducting research on various properties of conductivity in cuprates.

Today, there are several theoretical models of HTSC. These include the Ginzburg excitonic model, the Hubbard model, the Holstein-Hubbard model, the extended t-J model, etc. Many experimental data show that the electron-phonon interaction in HTSC cuprates is stronger than in other interactions, and the charge carriers are (bi)polarons. Taking this into account, there is a need for a theoretical explanation of the obtained experimental results based on the polaron approach.

**Connection of dissertational research with the plans of scientific research works of the scientific research institution, where the dissertation was conducted.** It was carried out as part of the plans to ensure the implementation of the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PF-6097 of 29.10.2020 “On approval of the concept of development of science until 2030”.

**The aim of the research.**  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprates is to determine the laws of dependence of the critical conductivity temperature- $T_c$  on the

---

<sup>3</sup> Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated January 28, 2022 No. UP-60 “On the development strategy of the new Uzbekistan for 2022 - 2026.”

uniaxial lattice voltage (pressure) and the degree of doping.

**The tasks of the research:** To achieve the goal, the following tasks were selected:

calculation of the dependence of the polaron mass on crystal parameters, in particular uniaxial strain and doping level, in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprates with a strong electron-phonon interaction (EFI) system;

To study of the effect of surface uniaxial strain on  $T_c$  in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  thin film;

To study the dependence of  $T_c$  on the level of doping for thin films grown on  $\text{LaSrAlO}_4$  and  $\text{SrTiO}_3$  substrates;

Calculation of derivative values of  $T_c$  for  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  by uniaxial pressure and uniaxial strain;

To study (calculate) the dependence of  $T_c$  on uniaxial strain for  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ;

Calculation of the uniaxial strain and uniaxial pressure derivatives of  $T_c$  for  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  .

**The objects of the research.** Strongly interacting electron-phonon system, polaron, bipolaron,  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprates.

**The subjects of the research.** Electron-phonon interaction (EFI), charge carrier (polaron) mass, uniaxial strain effect, uniaxial pressure effect, Bose-Einstein condensation (BEC) of bipolarons, conductivity.

**The methods of research.** Based on the stated problems using the extended Holstein-Hubbard model, the double quantization method, the bipolaron approach to conductivity and numerical calculation methods, the dependence of the polaron mass and the critical conductivity temperature in cuprates on the uniaxial voltage and doping level was calculated.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

a theoretical model describing the effect of uniaxial strain (pressure) on the conductivity superconductivity  $T_c$  of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprate samples of different doping levels was proposed;

for the first time, an explanation has been given for the change in polaron masses in a thin  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  film and the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  crystal structure under the action of uniaxial tension. In particular, the decrease (increase) in the polaron mass under the action of compressive stresses along the a(c) axis and the increase (decrease) in the polaron mass under the action of tensile stresses are explained;

the phase diagram  $T_c \sim x$  was obtained for the first time, representing the dependence of the critical conductivity temperature on the doping level, reflecting the anomaly “1/8” of thin  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  films;

the derivative values of conductivity  $T_c$  for  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  at different degrees of alloying for uniaxial tension and uniaxial pressure change depending on the value of the elastic constants;

The conductivity value of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprate  $T_c$  changes under uniaxial tension. The derivative values of permeability  $T_c$  for uniaxial tension and uniaxial pressure vary depending on the value of the elastic constants.

**Practical results of the research** consist of the following:

Polaron masses in the  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  thin film have been determined for several doping levels;

The dependence of the polaron mass in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprate on the voltage has been studied;

A theoretical approach was developed to explain  $T_c$  values for  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprate and  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  thin film within the framework of the Holstein-Hubbard model;

Derivatives of  $T_c$  for uniaxial pressure and uniaxial strain are explained for  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprates.

**The reliability of the research results.** Using modern methods of theoretical condensed matter physics tested in practice for many years, including the use of the extended Holstein-Hubbard model, theoretically obtained conclusions are confirmed by the conformity of  $T_c(T_{BEC})$  with the basic laws of uniaxial strain and doping degree. Also, it is the correspondence of the results of the calculation with the experimental data using the proven modern methods of theoretical physics.

**Scientific and practical significance of the research results.** The scientific significance of the research results is that they will be useful in developing a microscopic theory of the critical temperature of cuprates. Cuprates change the value of the critical conductivity temperature depending on changes in the polaron mass. This is accomplished by changing the distance (apical distance) between the copper in the copper-oxygen plane and the oxygen located above it. These cuprates are defined by their potential applications in improving theoretical knowledge of crystal structure and structure-dependent physical properties.

The practical significance of the research results lies in the fact that they can be used in the development of practical materials science, in the study of crystal structure and in the study of how the value of the critical conductivity temperature changes under the influence of external uniaxial tension.

**Implementation of the research results.** Based on the results of scientific research of this dissertation:

Samples of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprates of varying degrees of doping within the framework of a theoretical model describing the effect of uniaxial tension (pressure) on superconductivity  $T_c$ , calculating the masses of polarons in cuprates and obtaining the phase diagram  $T_c \sim x$ , representing the dependence of the critical conductivity temperature at the doping level from scientific and practical results Uzbekistan. The program of fundamental scientific research on the topic "Electronic theory of doped HTSC cuprates and its application to study the

formation and separation of dielectric/metallic and conducting phases at the nanoscale” is carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan in the period 2020-2024 (original number 2/1255-1397 Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan dated June 25, 2023). The use of these scientific results made it possible to develop a microscopic theory of high-temperature conductivity of cuprates, improve the energy of self-trapped electrons (or holes), the mass of self-trapped electrons (or holes), and the critical conductivity temperature of cuprate samples;

From the scientific results of calculating the change in superconductivity  $T_c$  of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprate samples of varying degrees of doping under the influence of external uniaxial tension in 2021-2023, “Production of Bi-HTSC ceramics with high critical parameters” in Kazakhstan, the S. Seifullin Agricultural Research University was involved in implementation of the scientific project “Obtaining technology” (certificate No. 2775/1.2.1.11.1 dated September 25, 2023, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin). The use of scientific results of the dissertation work made it possible to improve the critical parameters of conductors, that is, by introducing nanodispersed magnetic and refractory powders to create pin nanocenters, the critical density of the transport current of HTSC ceramics. The increase and cessation of accumulation of magnetic currents resulting from IR heating, as well as external influences (pressure), made it possible to understand the mechanism for increasing the critical temperature of cuprates.

**Testing of the research results.** The main results of the dissertation were reported and discussed at 15 International and Republican scientific and practical conferences.

**Publication of the research results.** 22 scientific works have been published on the topic of the dissertation. In particular, 7 articles were published in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations, 1 of Web of Science and 1 of which were published in Scopus journals.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, a list of published works and appendices. The volume of the dissertation is 116 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть; Part I)**

1. Jalekeshov A.S., Yavidov B.Ya. An influence of uniaxial strain (pressure) on the temperature of the Bose-Einstein condensation of intersite bipolarons: Possible implementation for  $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  // Science and Society-Nukus (Uzbekistan), 2021. -№1. -pp. 12-15 (OAK № 15).
2. Yavidov B.Ya., Jalekeshov A.S. Bipolaron approach to the uniaxial strain (pressure) dependencies of the critical temperature of superconductivity of La- and Y-based cuprate thin films // Scientific Bulletin Physical and Mathematical Research - Andijan (Uzbekistan), 2022. -№1(4). –pp. 16-24 (OAK № 13).
3. Jalekeshov A.S., Khajibaev D. G', Karimbaev E.Kh., Ganiev O.K., Yavidov B.Ya. A phase diagram of the thin films of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  cuprates // Journal of Fundamental and Research - Tashkent (Uzbekistan), 2022. -vol. 2. - Issue 3. -p. 1-5.
4. Jalekeshov A.S., Khajibaev D.G', Karimbaev E.Kh., Ganiev O.K., Yavidov B.Ya. On the critical temperature of superconductivity of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  thin films // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – Springer (USA), 2022. №12 –Vol. 35. –pp. 3529-3536. (OAK №1 Web of Science; IF=1.675).
5. Kabulov I.Sh., Jalekeshov A.S., Yavidov B.Ya.  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  kuprati o'taotkazuvchanlik kritik haroratining bir o'qli bosim bo'yicha hosilaviy qiymatlari // Fan va Jamiyat-Nukus (O'zbekiston), 2022. -№ 4. 14-16 –b (OAK № 15).
6. Jalekeshov A.S., Yavidov B.Ya. On the uniaxial strain (pressure) derivatives of the critical temperature of superconductivity of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  // Physica C: Superconductivity and its Applications – Elsevier (Netherlands), 2023. -issn-0921-4534. –v. 64. –pp. 1354177 (OAK № 3 Scopus; IF=1.534).
7. Jalekeshov A.S., Yavidov B.Ya. Bir o'qli deformatsiyaning  $\text{Y}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  kuprati o'taotkazuvchanlik kritik haroratiga ta'siri // Fan va Jamiyat-Nukus (O'zbekiston), 2023. –№ 1. 12-15-b (OAK № 15).

**II bo'lim (II часть; Part II)**

8. Jalekeshov A.S. Influence of uniaxial strains on  $T_c$  of cuprates using the extended Holstein–Hubbard model // Сборник докладов VI Республиканская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии», 1-2 декабря 2020 г. - Ташкент (Узбекистан), 2020. –стр. 146-148.
9. Jalekeshov A., Khajibaev D., Ganiev O., Yavidov B. Bose-Einstein condensation model for  $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ : pressure derivatives of the critical temperature //

- Материалы Республиканской конференции «Фундаментально-инновационные исследования в развитии физики и ее перспективы», 14 октября 2021 г. - Ташкент (Узбекистан), 2021. -стр. 65-66.
10. Jalekeshov A., Khajibaev D., Ganiev O., Yavidov B. Bose-Einstein condensation model for  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ : strain derivatives of the superconducting critical temperature // Материалы Республиканской конференции «Фундаментально-инновационные исследования в развитии физики и ее перспективы», 14 октября, 2021 г. - Ташкент (Узбекистан), 2021. -стр. 66-68.
  11. Jalekeshov A., Khajibaev D., Ganiev O., Kurmantayev A., Yavidov B. Uniaxial pressure derivatives of bose-einstein condensation temperature of bipolarons // Сборник материалов Республиканской научно-теоретической и практической конференции «Физика и экология», 15-16 октября 2021 г. - Нукус (Узбекистан), 2021. -стр. 189-190.
  12. Jalekeshov A., Khajibaev D., Ganiev O., Kurmantayev A., Yavidov B. Uniaxial strain derivatives of Bose-Einstein condensation temperature of bipolarons // Сборник материалов Республиканской научно-теоретической и практической конференции «Физика и экология», 15-16 октября. 2021 г. - Нукус (Узбекистан), 2021. -стр. 197-199.
  13. Jalekeshov A.S., Xajibaev D. G', Berdibaev J.A., Yavidov B.Ya.  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yuqqa pardasi o'tao'kazuvchanligini kupratlarning zanjir modelida o'rganish // "Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari" mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari to'plami, 27-28-may 2022-y. - Urganch (O'zbekiston), 2022. 232-235-b.
  14. Jalekeshov A.S., Xajibaev D. G', Kabulov I.Sh., Yavidov B.Ya. LSAO va STO tagliklarida o'stirilgan LASO yuqqa pardalar o'tao'kazuvchanlik harorati haqida" // "Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari to'plami, 27-28-may 2022-y. – Urganch (O'zbekiston), 2022. 235-237-b.
  15. Jalekeshov A.S., Xajibaev D.G', Berdibaev J.A., Yavidov B.Ya.  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  yuqqa pardasi o'tao'kazuvchanlik haroratining hosilaviy qiymatlari haqida // "Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari" mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari to'plami, 27-28-may 2022-y. – Urganch (O'zbekiston), 2022. 296-299-b.
  16. Jalekeshov A., Khajibaev D., Yavidov B.Ya. Modeling of strain (pressure) dependencies of  $T_c$  of La-based and Y-based high- $T_c$  cuprate thin films: a bipolaron model // Материалы Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» часть 2. 25 май, 2021 г. -Фергана, (Узбекистан), 2021. - стр. 88-91.
  17. Yavidov B.Ya., Jalekeshov A.S. Bipolaron model of La-based and Y-based high- $T_c$  cuprate thin films // Abstracts book for 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2021), Oct 21-27, 2021. -Milas-Bodrum (Turkey), 2021. –p. 121.
  18. Yavidov B.Ya., Ganiev O., Nurimbetov K., Jalekeshov A., Khajibaev D. On superconducting critical temperature of La-based cuprate films on variety

- substrates // Book of Abstracts of the International Conference “Modern Problems of Nuclear Energetics and Nuclear Technologies”, November 23-25, 2021. - Tashkent (Uzbekistan), 2021. –p. 181.
19. Jalekeshov A., Khajibaev D., Ganiev O., Yavidov B. Bose-Einstein condensation model for  $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  cuprates’ films // Book of Abstracts of the International Conference “Modern Problems of Nuclear Energetics and Nuclear Technologies”, November 23-25, 2021. – Tashkent (Uzbekistan), 2021. -pp. 184-185.
20. Жалекешов А.С., Курмантаев А.Н., Сапарбаев Т., Явидов Б.Я. О критической температуре сверхпроводимости тонких пленок // Сборник материалов IV Международный научный форум «Ядерная наука и технологии», 26-30 сентябрь. 2022 г. - Алматы (Казахстан), 2022. - стр. 134.
21. Jalekeshov A., D. Khajibaev, Yavidov B. On the uniaxial pressure derivatives of the  $T_c$  of LSCO cuprate // Abstract book for International conference on quantum materials and technologies (ICQMT2022), oct 16-22, 2022. - Milas-Bodrum (Turkey), 2022. - p.105.
22. Jalekeshov A., Nurimbetov K., Yavidov B. Ya. On doping dependence of  $T_c$  and  $\partial T_c / \partial p_i$  ( $i=a,b,c$ ) of cuprates // Сборник материалов Международной научной конференции «Физика твердого тела», 8-10 декабря 2022 г. - Астана (Казахстан), 2022. - стр. 81-83.

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg‘ona politexnika institutining “Ilmiy texnika jurnali” tahririyatida 2023-yil 16-noyabrda tahrirdan o‘tkzildi.

Bosishga ruxsat etildi: 2024-y. Nashriyot bosma tabog‘i-3.5.

raqamli bosma usuli. Times garniturası.

Shartli bosma tabog‘i-1.75. Bichimi 64x108 1/16. Adadi 50.

“ALPHA BRAND” MCHJ

150107. Farg‘ona shahar, Farg‘ona ko‘chasi 86-uy

