

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI**

**JUMABAYEVA GULMIRA KAIRBAYEVNA**

**KOVAKLI LEGIRLANGAN  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  VA LANTAN ASOSLI  
KUPRATLARDA METAL-DIELEKTRIK O‘TISHLAR VA ULARNING  
YUQORI HARORATLI O‘TAO‘TKAZUVCHANLIKKA TA’SIRI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

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

**Toshkent – 2025**

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

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

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

**Jumabayeva Gulmira Kairbayevna**

Kovakli legirlangan  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  va lantan asosli kupratlarda metal-  
dielektrik o'tishlar va ularning yuqori haroratli o'tao'tkazuvchanlikka  
ta'siri ..... **3**

**Жумабаева Гулмира Каирбаевна**

Металл-диэлектрик переходы и их влияние на высокотемпературную  
сверхпроводимость в дырочно легированных купратах на основе  
лантана и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ..... **23**

**Jumabaeva Gulmira Kairbaevna**

Metal-insulator transitions and their influence on high-temperature  
superconductivity in hole-doped cuprates based on lanthanum and  
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ..... **44**

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... **48**

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI**

**JUMABAYEVA GULMIRA KAIRBAYEVNA**

**KOVAKLI LEGIRLANGAN  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  VA LANTAN ASOSLI  
KUPRATLARDA METAL-DIELEKTRIK O‘TISHLAR VA ULARNING  
YUQORI HARORATLI O‘TAO‘TKAZUVCHANLIKKA TA’SIRI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

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

**Toshkent – 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1108 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Doktorlik dissertatsiyasi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) va "Ziyonet" Axborot-ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

<b>Ilmiy rahbar:</b>	<b>Kurbanov Ulugbek Tajibayevich</b> fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy hodim
<b>Rasmiy opponentlar:</b>	<b>Raximov Abdulla Mannabovich</b> fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy hodim <b>Yavidov Bahram Yangibayevich</b> fizika-matematika fanlari doktori, dotsent
<b>Yetakchi tashkilot:</b>	<b>Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti</b>

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil \_\_\_\_\_ soat \_\_\_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel. (+99871) 289-31-41; faks (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_\_\_ raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel. (+99871) 289-31-19).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "\_\_\_\_\_" kuni tarqatildi.  
(2025-yil "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_\_ raqamli reyestr bayonnomasi)

**M.Yu. Tashmetov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

**O.R. Tojiboev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD., katta ilmiy xodim

**E.M. Tursunov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash huzuridagi Ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., professor

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

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Hozirgi vaqtda zamonaviy fizikaning dolzarb muammolari legirlangan mis oksidli (kuprat) o'ta o'tkazgichlarida va unga o'xshash kondensirlangan tizimlarda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik va metall-dielektrik o'tishlar muammolari hisoblanadi. Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan (YuHO'O') kupratlar elektron jarayonlarni adekvat miqdoriy nazariyasini qurmasdan va metall/o'ta o'tkazuvchan-dielektrik o'tishlarni, turli YuHO'O'-materiallarda dielektrik, metall va o'ta o'tkazuvchan fazalarning hosil bo'lishi va bo'linishini batafsil o'rganmasdan turib, ushbu eng muhim va murakkab muammolarni hal qilish mumkin emas. Legirlangan kupratlarda ushbu o'tishlarni o'rganish yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik mexanizmlarini chuqurroq tushunishga imkon beradi. Qattiq jismlardagi metall-dielektrik o'tishlar nazariyasi zaryadlangan kvazizarralar (elektronlar yoki kovaklar) bilan ifodalangan tok tashuvchilarning lokallashgan va delokallashgan holatlari konsepsiyasini o'z ichiga olgan yagona unifikatsiyalangan model asosida rivojlanishi mumkin.

Zamonaviy eksperimental tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, kam legirlangan, optimal legirlangan va hatto o'ta legirlangan YuHO'O'-kupratlarning elektron xususiyatlari an'anaviy dielektriklar, metallar va o'ta o'tkazgichlarning xususiyatlaridan sezilarli darajada farq qiladi. Ushbu tadqiqotlar natijasida nafaqat legirlangan YuHO'O'-kupratlardagi metall-dielektrik o'tishlar va o'ta o'tkazuvchanlikka o'tishlar haqida yangi bilimlar paydo bo'ladi, balki ushbu bilimlar asosida energetika va texnikaning turli sohalarida amaliy qo'llanilishi mumkin bo'lgan yuqori kritik temperaturali o'ta o'tkazuvchan  $T_c$  o'tishga ega istiqbolli YuHO'O'-materiallari yaratiladi. Shuning uchun, ushbu o'zaro bog'liq fundamental hodisalarning mexanizmlarini uchun metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarning imkoniyatlari va ularning o'ta o'tkazuvchanlikka o'tishning kritik harorati  $T_c$  ga ta'sirini, legirlangan YuHO'O'-kupratlarda metall/o'ta o'tkazuvchan va dielektrik fazalarning birgalikda mavjudligini o'rganish zarurdir.

O'zbekiston Respublikasida yarimo'tkazgich va o'ta o'tkazgichlar materialshunosligi sohalari jadal rivojlanmoqda, shu bilan birga, legirlangan YuHO'O' kupratlarda lokallashgan kovakli tok tashuvchilarning tabiati va metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarning mumkin bo'lgan mexanizmlarini o'rganishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Kelgusida ilmiy taraqqiyot va amaliyotda foydalanish uchun muhim ahamiyatga ega bo'lgan ushbu fundamental tadqiqotlar 2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida o'z aksini topgan.<sup>1</sup>

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmoni, 2017-yil 13-fevraldagi PQ-2772-sonli "2017-2021-yillarda

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni.

elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari to‘g‘risida”, 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-sonli “Fanlar akademiyasi faoliyati, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning II. “Energetika, energiya tejamkorligi va muqobil energiya manbalari” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Kovakli legirlangan kupratlarda metall-dielektrik o‘tishlarni tadqiq qilish bilan dunyodagi ko‘plab tadqiqotchilar shug‘ullangan va shug‘ullanmoqda, shu jumladan, rossiyalik (L.D. Landau, S.I. Pekar, D.I. Khomsky, A.S. Alexandrov, V.F. Gantmakher, E.G. Maksimov, S.G. Ovchinnikov va boshq.), ukrainalik (A.L. Solovjov, R.V. Vovk va boshq.), germaniyalik (G. Fröhlich, H. Hess, F. Hensel va boshqalar), ingliz olimlari (R. Peierls, N.F. Mott, A. Wilson, J. Hubbard, D.M. Egles, P. P. Edwards, R.L. Johnston, A. Carrington, J.W. Loram, T. Rice va b.), belgiyalik (J.T. Devreese), yaponyalik (Y. Toyozawa, S. Uchida, Y. Koike, S. Ono, Y. Ando, M. Ido, A. Matsuda, T. Kato va boshqalar), amerikalik (R. Feynman, T. Holstein, P.W. Anderson, S.A. Kivelson, P.A. Lee, C.M. Varma, J. Devreyes, D. Emin, L.N. Cooper, W.J. Emery va boshqalar) va o‘zbekistonlik (S. Dzhumanov, B.Ya. Yavidov, P.J. Baymatov, B. Abdullayev, U.T. Kurbanov va boshqalar) tomonidan ko‘p yillar davomida o‘rganilgan.

Bu muammolar uzoq tarixga ega bo‘lib, 1933-yildan, Landau ishqoriy-galoid kristallarda F-markazlarning (elektron bilan qamrab olingan anion vakansiyasi) xossalari tushuntirib, elektronning avtolokallashish g‘oyasini ilgari surgandan boshlanadi. 1931-1958-yillar oralig‘ida A.Vilson, N.F.Mott, F.Vigner, R.Payers va F.V.Andersonlar kabi olimlar elektronlarning delokallashgan holatining lokallashgan holatga o‘tishini tushuntirish bilan shug‘ullanganlar va metall-dielektrik o‘tishlarning turli nazariyalarini taklif qilganlar. Ular orasida quyidagilarni ajratib ko‘rsatish mumkin: to‘liq to‘ldirilgan valent zonasining yuqorida joylashgan to‘ldirilmagan zona bilan kesishishida (Vilson o‘tishlari), kuchli elektron korrelyatsiyaning ta’siri, shu jumladan kristall panjaraning bitta atomi yoki ionida joylashgan ikkita elektronning Kulon itarilishi (Mott o‘tishi), elektron gazning kristallanishi (Vigner o‘tishi), bir o‘lchamli kristall panjaraning buzilishi va uning davrining ikki baravar ortishi (Payers o‘tishi) va panjaraning tartibsizligi (Anderson o‘tishi). Keyingi yillarda bu g‘oyalar qattiq jismlarning turli sinflarida, xususan, oksidli materiallar va legirlangan yarimo‘tkazgichlarda tok tashuvchilarning lokallashish va delokallashish hodisalarini va metall-dielektrik o‘tishlarni o‘rganishda rivojlantirildi. Xususan, Mott va Andersonning metall-dielektrik o‘tishlar haqidagi g‘oyalari oksidli dielektriklar va legirlangan yarimo‘tkazgichlar fizikasi sohasida faoliyat yuritadigan qator olimlarning tadqiqotlarida sezilarli darajada rivojlantirildi (J. Hubbard, O. Madelung, M.I.

Klinger, J.R. Kullen, E.R. Kallen, J. Kanamor, J. Zaanen, G.A. Savatski, J.V. Allen, B.I. Shklovskiy, A.L. Efros, G. Kotliar, V. Dobrosavljevik). Yangi legirlangan mis-oksidi (kupratli) YuHO‘O‘lar kashf etilishi bilan ushbu murakkab materiallarda tok tashuvchilarning lokallashishi va metall-dielektrik o‘tishlar muammolarini zamonaviy usullar va yondashuvlarni qo‘llagan holda tadqiq etish davom ettirildi (M. Imada, P. Klemmer, J. Fink, A.N. Lavrov, V.F. Gantmakher, G.S. Boebinger, Y. Endo, S. Castellani, P.A. Magette, J.B. Su, Yu Li, S. Ono, S. Djumanov).

Keng qamrovli nazariy tadqiqotlarga qaramasdan, legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda kovakli tok tashuvchilarning lokallashish va delokallashish mexanizmlari va metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishlar yetarli darajada o‘rganilmagan. Bu o‘tishlarning adekvat miqdoriy mezonlari haligacha aniqlanmagan, bu esa ularni to‘liq tushunishni qiyinlashtiradi. Bundan tashqari, YuHO‘O‘-materiallarda tok tashuvchilar lokallashishi va metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishlar bo‘yicha nazariy ishlarda ushbu jarayonlarda muhim rol o‘ynashi mumkin bo‘lgan g‘ayrioddiy elektron-nuqson-fonon va elektron-fonon kuchli o‘zaro ta’sirlar va polaron effektlarning ta’siriga yetarlicha e’tibor berilmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrda PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo‘ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan “YuHO‘O‘-kupratlarning elektron nazariyasi va uni dielektrik/metall va o‘ta o‘tkazuvchanlik fazalarining hosil bo‘lishi va nanomasshtabli bo‘linishida tadqiq qilish uchun qo‘llash” mavzusi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda bir va ikki turdagi tok tashuvchilarni lokallashish mexanizmlari, yangi metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishlarni amalga oshirish mexanizmlarini va ularning o‘ta o‘tkazuvchanlikka o‘tish kritik haroratiga  $T_c$  ta’sirini aniqlashdan iborat.

#### **Tadqiqotning vazifalari:**

kupratli o‘ta o‘tkazgichlarning ikki tashuvchili modeli asosida kuchli elektron-fonon va elektron-kirishma-fonon o‘zaro ta’sirlari natijasida yuzaga kelgan legirlangan kupratlardagi metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tish mexanizmlarini o‘rnatish;

legirlangan oksidli YuHO‘O‘ materiallarida metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishlarning yangi mezonlarini va ulardagi kam legirlangan rejimdan o‘ta legirlangan rejimgacha bunday o‘tishlarni aniqlash;

kam va optimal legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda metall/o‘ta o‘tkazuvchan va dielektrik fazalarning bo‘linishi va birgalikda mavjudligini namoyish etish;

kam va optimal legirlangan oksidli YuHO‘O‘ materiallarida o‘ta o‘tkazuvchanlikka o‘tishning kritik haroratiga metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishlarning ta’sirini va ularda o‘ta o‘tkazuvchanlikning susayishi va kuchayishi

sabablarini aniqlash.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida kam legirlangan, optimal legirlangan va o'ta legirlangan  $La_{2-x}Ba_xCa_yCuO_4$  (LBCCO),  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  (LNSCO),  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  (LBCO),  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  (LSCO) va  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO) kupratlari olingan.

**Tadqiqotning predmetini** turli legirlash darajasiga ega bo'lgan YuHO'O'-kupratlarda bir va ikki turdagi zaryad tashuvchilarning lokallashish va delokallashish jarayonlari, yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar va ularning  $T_c$  ga ta'siri tashkil etadi.

**Tadqiqot usullari:** variatsion usullar, adiabatik yaqinlashish va tashuvchilarning xususiy va xususiy bo'lmagan avtolokalashishning kontinual modelidan foydalanish, kuchli bog'lanish usuli, kompyuter grafikasi (Mathematica, OriginPro 8, CorelDRAW).

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

$La_{2-x}Ba_xCa_yCuO_4$  va  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  kuprat o'ta o'tkazgichlarning ikki tashuvchili modeli doirasida metall-dielektrik o'tishlar dastlab kirishmasiz sohalarda kam legirlangan rejimdan optimal legirlangan rejimgacha, keyin esa optimal legirlangan va o'ta legirlangan rejimlarda kichik radiusli kirishmali sohalarda sodir bo'lishi ko'rsatilgan;

kovakli legirlangan  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  va  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  kupratlarda kuchli kovakfonon o'zaro ta'sirlari va polyaron effektlari natijasida yuzaga keladigan yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarning yuqori chastotali dielektrik singdruvchanlik  $\epsilon_\infty$  ga va ulardagi polyaronlarning bog'lanish energiyasiga bog'liqligi aniqlangan, bu o'tishlar kam legirlangan rejimdan o'ta legirlangan rejimgacha bo'lgan oraliqda kuzatilgan;

kam legirlangan va optimal legirlangan YuHO'O'-kupratlar  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ ,  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  va  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  da metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarning o'ta o'tkazuvchanlikning kritik haroratiga mumkin bo'lgan ta'sirlari va ularda o'ta o'tkazuvchanlikning susayishi va kuchayishi sabablari aniqlangan;

YuHO'O'-kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlikka o'tish kritik harorati  $T_c$  kam legirlangan kupratlarda polyaron effektining susayishi va uning optimal legirlangan kupratlarda yo'qolishi sababli o'ta o'tkazuvchanlik faza ulushining ortishi va dielektrik faza ulushining pasayishi bilan kam legirlangan rejimdan optimal legirlangan rejimgacha ortishi ko'rsatilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

ikki turdagi kovak tashuvchilarga ega bo'lgan legirlangan kupratli materiallarda yangi metall-dielektrik o'tishlar nazariyasi ishlab chiqilgan;

yangi metall/o'ta o'tkazuvchan-dielektrik o'tishlarning mezonlari va ularning legirlangan kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlikka o'tish kritik harorati  $T_c$  ga ta'siri uchun formulalar olingan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** kirishmalar yaqinida va deformatsiyalanuvchi kristall panjarada zaryad tashuvchilarning avtolokalizatsiya jarayonlarini tavsiflash uchun sinovdan o'tgan matematik usullar va fizik

modellardan, shuningdek, Mott-Xabbar modelidan foydalanish va olingan natijalarning mavjud eksperimental ma'lumotlarga muvofiqligi bilan tasdiqlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, olingan nazariy xulosalar bir va ikki kovakli zaryad tashuvchilarning lokallashishi va delokallashishi, metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar haqidagi fizik tasavvurlarni kengaytirishga yordam beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati legirlangan YuHO'O'-materiallardagi yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarning rivojlangan nazariyasi elektron xususiyatlari yaxshilangan oksidli YuHO'O'-materiallarni yaratishning mumkin bo'lgan yo'llarini oldindan bashorat qilish imkonini berishi bilan belgilanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Kovakli legirlangan kupratlarda bir va ikki turdagi zaryad tashuvchilarning metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlari va ularning yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikka ta'sirini o'rganish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

$La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  va  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  kupratli o'ta o'tkazgichlarning ikki tashuvchili modeli, shuningdek, o'ta o'tkazuvchanlikning kritik haroratiga metall/o'ta o'tkazuvchan-dielektrik o'tishlarning ta'siri va  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ ,  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  va  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  materiallarda o'ta o'tkazuvchanlikning susayishi va kuchayishining aniqlangan sabablari bo'yicha olingan natijalar, "Kvant fizikasi" kursi dasturi doirasida o'quv jarayonida qo'llanilgan (Qizil-Qiya gumanitar-pedagogika institutining 2024 yil 3 dekabrda 395-sonli xati). Natijalardan foydalanish talabalarning zamonaviy kondensirlangan holat fizikasi muammolari haqidagi tushunchalarini kengaytirish va kvant fizikasi kursi bo'yicha talabalar uchun ta'lim sifatini oshirish imkonini bergan;

kovakli legirlangan  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  va  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  kupratlarda kuchli kovakfononli o'zaro ta'sirlar va polaron effektlar natijasida hosil bo'lgan yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarni amalga oshirish bo'yicha olingan natijalar Birlashgan yadro tadqiqotlar instituti N.N. Bogolyubov nomidagi Nazariy fizika laboratoriyasida yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarda olib borilayotgan nazariy tadqiqotlar doirasida foydalanilgan (Birlashgan yadro tadqiqotlar instituti N.N. Bogolyubov nomidagi Nazariy fizika laboratoriyasi 13.12.2024-yildagi 300-20/25-sonli xati). Natijalardan foydalanish nazariy modellarning eksperimental natijalar bilan muvofiqligini baholash, xususan, zamonaviy kondensirlangan holat fizikasi muammolari haqidagi tasavvurlarni kengaytirish imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 10 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 14 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola, jumladan, 2 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda nashr etilgan

**Dissertatsiya ishining tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 116 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish qismida** dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi asoslangan, tadqiqot ishning maqsadi va vazifalar, ob'ekti, predmeti va usullari tavsiflangan, O'zbekiston Respublikasi fan va texnikasini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni amalyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi haqida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Kuprat YuHO'O'-materiallarning elektron xossalari va metall-dielektrik o'tishlarning turlari**" deb nomlangan birinchi bobida tadqiqot yo'nalishi bilan bog'liq adabiyotlar sharhi keltirilgan. Ushbu bob doirasida legirlanmagan kupratning elektron xususiyatlari, kristallografik tuzilishi va antiferromagnit xususiyatlari tahlil qilingan, shuningdek, YuHO'O' kuprat materiallarida zaryad tashuvchilarning mumkin bo'lgan lokalizatsiya mexanizmlari va metall-dielektrik o'tishlarning asosiy turlari muhokama qilingan. Xususan, Vilson, Mott, Anderson, Payerls va boshqa tadqiqotchilar tomonidan taklif etilgan metall-dielektrik o'tish mexanizmlari tahlil qilingan. Legirlangan YuHO'O'-kupratlarda metall-dielektrik o'tishlar bilan bog'liq hal qilinmagan asosiy masalalar aniqlandi, ularni hal qilish uchun mumkin bo'lgan yondashuvlar muhokama qilindi. Tahlillar asosida ushbu dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning "**Lantan asosli kovakli legirlangan kupratlarda metall-dielektrik o'tishlar**" deb nomlangan ikkinchi bobida biz kovakli tok tashuvchilarning lokallashgan holatlarini hosil qilish, kichik va katta radiusli kirishmalar bilan legirlangan Lantan asosli o'ta o'tkazgichlarda metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarni amalga oshirish imkoniyatlarini bir va ikki turdagi zaryad tashuvchilar modelida o'rgandik.

Kovakli legirlangan kupratlarda har xil turdagi legirlovchi kirishmalar uchun vaziyatlar butunlay boshqacha bo'lishi mumkin. Xususan, kovaklar va kichik radiusli nuqsonlar uchun deformatsiya potentsiali konstantasi  $E_d$  va  $E_{dD}$  ishoralari har doim musbat, katta radiusli nuqsonlar uchun esa  $E_{dD}$  ishorasi manfiy bo'ladi.

I.  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  va  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  larda kovaklar va kichik radiusli legirlovchi kirishmalarining deformatsiya potentsiallari ishoralari musbat, bu yerda tok tashuvchi-kirishma-fonon o'zaro ta'siri kichik radiusli legirlovchi kirishmalar yaqinida (masalan,  $Ca^{2+}$  va  $Nd^{3+}$  ionlari yaqinida) tortishuvchi hisoblanadi. Binobarin, ushbu lantan asosli kupratlardagi kovakli tashuvchilar yuqori legirlash darajalarida kirishma zonasini hosil qilishi mumkin bo'lgan vodorodsimon bo'lmagan lokallashgan kirishma holatlarini hosil qilgan holda bunday kirishmalar yaqinida avtolokallashadi. Aytish mumkinki, kovakli tashuvchilarning ma'lum bir

qismi kichik radiusli legirlovchi kirishmalar yaqinida joylashadi, kovakli tashuvchilarning boshqa qismi esa deformatsiyalanuvchi panjarada katta polyaronlarni hosil qilish bilan avtolokallashadi. Endi kichik radiusli kirishmalar bilan legirlangan ( $Ca^{2+}$  va  $Nd^{3+}$ ) lantan kupratlarda kuchli tok tashuvchi-kirishma-fonon va tok tashuvchi-fonon o'zaro ta'sirlar bilan bog'liq bo'lgan metall-dielektrik o'tishlarni o'rganishda ushbu holatlarni hisobga olamiz. Endi biz ikki tok tashuvchli kuprat o'ta o'tkazgich modelida metall-dielektrik o'tishlar uchun yangi mezonlarni aniqlaymiz.

Tabiiyki, kirishma markazlari va polyaronlar legirlangan kupratlarda o'ta panjaralar, shuningdek kirishma va polyaron zonalarini hosil qilishi mumkin. Legirlangan materiallarda zaryad tashuvchilarning ikkita mavjud turi kirishma va polyaron zonalarida joylashganda, kirishma zonasidagi zaryad tashuvchilarning Fermi energiyasi  $\varepsilon_{FI}$  va polyaron zonasidagi Fermi energiyasi  $\varepsilon_{Fp}$  quyidagicha aniqlanishi mumkin

$$\varepsilon_{FI} = \hbar^2(3\pi^2 f_I n)^{2/3} / 2m_I \quad (1)$$

va

$$\varepsilon_{Fp} = \hbar^2(3\pi^2(1 - f_I)n)^{2/3} / 2m_p \quad (2)$$

bu yerda  $f_I$  - kirishma zonasida joylashgan zaryad tashuvchilarning ulushi,  $m_I$  - bunday zaryad tashuvchilarning massasi,  $m_p$  - katta polyaronlarning massasi,  $n$  - legirlangan zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi.

Ikki tashuvchili kupratli o'ta o'tkazgich modelida tashuvchilarning lokalizatsiya shartlari yoki metall-dielektrik o'tishlar uchun yangi mezonlar bir tashuvchili kuprat o'ta o'tkazgich modelida aniqlangan metall-dielektrik o'tishlar uchun yozilgan mezonlardan farq qiladi va quyidagicha yozilishi mumkin

$$\frac{E_I}{\varepsilon_{FI}} = \frac{2E_I m_I}{\hbar^2(3\pi^2 f_I n)^{2/3}} \geq 0.5 \frac{a_I}{R_I} \quad (3)$$

va

$$\frac{E_p}{\varepsilon_{Fp}} = \frac{2E_p m_p}{\hbar^2(3\pi^2(1 - f_I)n)^{2/3}} \geq 0.5 \frac{a_p}{R_p} \quad (4)$$

bu yerda  $E_I$  - kirishma markazlari bilan bog'langan zaryad tashuvchilarning bog'lanish energiyasi,  $a_I$  - kirishmaning o'ta panjara parametri,  $R_I$  - kirishma markazi radiusi,  $E_p$  - polyaronning bog'lanish energiyasi,  $a_p$  - polyaronning o'ta panjara parametri,  $R_p$  - polyaron radiusi. Endi (3) va (4) mezonlar ma'lum legirlash darajasi  $n=n_c$  uchun quyidagicha yozilishi mumkin

$$x = x_{cI} = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 f_I n_a} \left[ \frac{4m_I E_I R_I}{\hbar^2 a_I} \right]^{3/2} \quad (5)$$

va

$$x = x_{cp} = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2(1-f_I)n_a} \left[ \frac{4m_p E_p R_p}{\hbar^2 a_p} \right]^{3/2} \quad (6)$$

bu yerda  $n_a = 1/V_a$  - panjara atomlarining zichligi,  $V_a$  - kupratlardagi  $CuO_2$  ning formula birligiga to'g'ri keladigan hajm.

Kirishma markazlari va polyaronlar oddiy kub o'ta panjaralarni hosil qiladi deb taxmin qilamiz. Kirishma markazlari va polyaronlarning oddiy kub o'ta panjaralari uchun panjara parametrlari  $a_I = 2R_I$  va  $a_p = 2R_p$  kabi aniqlanishi mumkin. Shunday qilib, ushbu kirishma markazlari va polyaronlarga metall-dielektrik o'tishlar uchun (5) va (6) mezonlarni qo'llab, biz kuchli tok tashuvchi-kirishma-fonon va tok tashuvchi-fonon o'zaro ta'sirlar tufayli yuzaga kelgan metall-dielektrik o'tishga mos keladigan quyidagi legirlashning kritik darajalarini olamiz:

$$x_{cl} = \frac{V_a}{3\pi^2 f_I \hbar^3} [2m_I E_I]^{3/2} \quad (7)$$

va

$$x_{cp} = \frac{V_a}{3\pi^2(1-f_I)\hbar^3} [2m_p E_p]^{3/2} \quad (8)$$

Legirlashning bunday kritik darajalarida kupratlarda dielektrik holatdan metall holatga yoki metall holatdan dielektrik holatga o'tishlar sodir bo'ladi.

### 1-jadval

$\eta = 0.02$  hol uchun  $E_I$  va  $\varepsilon_\infty$  ning turli qiymatlarida legirlashning hisoblangan kritik darajalari  $x_{cl}$

$E_I=0.1240$ eV, $\varepsilon_\infty=3.5$		$E_I=0.0943$ eV, $\varepsilon_\infty=4$		$E_I=0.0741$ eV, $\varepsilon_\infty=4.5$	
$f_I$	$x_{cl}$	$f_I$	$x_{cl}$	$f_I$	$x_{cl}$
0.5	0.213	0.5	0.141	0.5	0.098

(7) ifodadan foydalanib,  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  va  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  larda kuchli tok tashuvchi-kirishma-fonon o'zaro ta'sirlari natijasida yuzaga kelgan metall-dielektrik o'tishlar sodir bo'ladigan  $x_{cl}$  legirlashning kritik darajalarini hisoblaymiz.  $\eta=0.02$  da  $E_I$  va  $\varepsilon_\infty$  ning turli qiymatlarida  $x_{cl}$  uchun hisoblash natijalari 1-jadvalda keltirilgan. Ushbu natijalardan kelib chiqadiki,  $\varepsilon_\infty$  kamayishi bilan metall-dielektrik o'tishlar legirlashning yuqori darajalarida sodir bo'ladi.

(8) ifodadan foydalanib,  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  va  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  larda kuchli tok tashuvchi-fonon o'zaro ta'sirlar natijasida yuzaga keladigan metall-dielektrik o'tishlar sodir bo'ladigan  $x_{cp}$  legirlashning kritik darajalarini hisoblaymiz.

Hisoblash natijalari  $x_{cp}$  uchun  $\eta=0.02$  da,  $E_p$  va  $\varepsilon_\infty$  ning turli qiymatlarida 2-jadvalda keltirilgan.

$\eta=0.02$  hol uchun  $E_I$  va  $\varepsilon_\infty$  ning turli qiymatlarida legirlashning hisoblangan kritik darajalari  $x_{cp}$

$E_p=0.1063 \text{ эВ},$ $\varepsilon_\infty=3.5$		$E_p=0.0811 \text{ эВ},$ $\varepsilon_\infty=4$		$E_p=0.0640 \text{ эВ},$ $\varepsilon_\infty=4.5$	
$f_p$	$x_{cp}$	$f_p$	$x_{cp}$	$f_p$	$x_{cp}$
0.5	0.144	0.5	0.096	0.5	0.067

1 va 2 jadvallardan ko‘rinib turibdiki, metall-dielektrik o‘tishlar legirlashning yuqori darajalarida  $\varepsilon_\infty$  ning 4.5 dan 3.5 gacha kamayishi bilan sodir bo‘ladi.

Ilgari taklif etilgan nazariy modellar tajribalarda olingan ma‘lumotlarni to‘liq tushuntirib bera olmaydi, ammo taklif etilgan modeldan tajribalarda olingan natijalarga yaxshi mos keladigan qiymatlarni olish uchun foydalanish mumkin.

II. Agar legirlovchi kirishmalar yaqinida elektron-fonon o‘zaro ta’sirlar kuchsiz bo‘lsa, kovakli legirlangan kupratlarda oddiy vodorodsimon kirishma markazlari hosil bo‘ladi. Bunday holat  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  (LSCO) va  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  (LBCO) da amalga oshiriladi, ularda  $Sr^{2+}$  (1.31 Å) va  $Ba^{2+}$  (1.47 Å) radiuslari  $La^{3+}$  (1.216 Å) ga qaraganda kattaroq, shuning uchun  $Sr^{2+}$  va  $Ba^{2+}$  uchun deformatsiya potentsiali ishorasi manfiy. Bundan kelib chiqadiki, LSCO va LBCO dagi katta radiusli legirlangan kirishmalar yaqinidagi kovaklarning panjara bilan o‘zaro ta’siri itaruvchi kirishma potentsiali bilan kamaytiriladi, kovak tashuvchilar esa legirlangan kirishmalardan uzoq masofada joylashadi (ya’ni, kovak tashuvchilar legirlangan kirishmalardan uzoqda ta’sir etuvchi Kulon tortishishi bilan kuchsiz bog‘langan)  $Sr^{2+}$  va  $Ba^{2+}$  vodorodsimon kirishma markazlarini hosil qiladi. Bu bir tok tashuvchili qattiq jism modelida kirishma markazlaridagi elektron korrelyatsiyaga bog‘liq bo‘lgan Mott metall-dielektrik o‘tishining yaqqol misolidir. Ushbu metall-dielektrik o‘tish faqat LSCO va LBCO da juda past legirlash darajalarida ( $x \leq 0.02$ ) sodir bo‘lishi mumkin. Bundan tashqari, bu materiallarda kovaklarning panjara bilan kuchli o‘zaro ta’siri tufayli yangi metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishning boshqa turi kuchsiz legirlangan, optimal legirlangan va hatto o‘ta legirlangan kupratlarda bir tok tashuvchili qattiq jism modelida ham mavjud bo‘lishi mumkin. Legirlangan kupratlarda bunday yangi metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishning aniq mezonini quyidagicha yozish mumkin

$$x = x_c = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 n_a} \left[ \frac{4m_p E_p R_p}{\hbar^2 a_p} \right]^{3/2}. \quad (9)$$

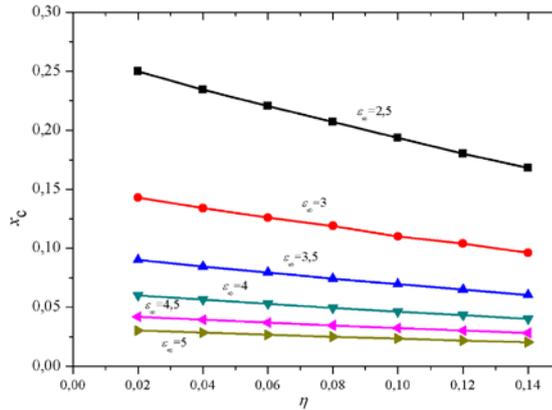
Turli koordinatsion sonlarga  $z$  ega bo‘lgan oddiy kub, hajmiy markazlashgan va yoqlarda markazlashgan kub polyaron o‘ta panjaralari uchun panjara doimiylarini  $R_p = \frac{a_p}{2}$ ,  $R_p = \frac{\sqrt{3}}{4} a_p$  va  $R_p = \frac{\sqrt{2}}{4} a_p$  formulalari yordamida aniqlash mumkin. Metall/o‘ta o‘tkazgich-dielektrik o‘tishlar uchun (9) mezonni qo‘llab, oddiy kub, hajmiy markazlashgan kub va yoqlarda markazlashgan kub polyaron o‘ta panjaralar holatlarida quyidagilarni yozish mumkin:

$$x_{c1} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3 n_a} [2m_p E_p]^{3/2}, \quad z = 6 \quad (10)$$

$$x_{c2} = \frac{1}{\sqrt[4]{3}\pi^2 \hbar^3 n_a} [m_p E_p]^{3/2}, \quad z = 8 \quad (11)$$

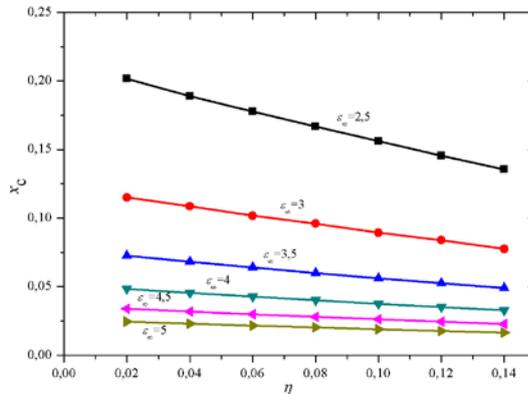
$$x_{c3} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3 n_a} [\sqrt{2}m_p E_p]^{3/2}, \quad z = 12 \quad (12)$$

LSCO va LBCO da  $\eta$  kamayishi bilan  $x_c$  o'zgarishi 1-rasmda  $z=6$ ,  $\varepsilon_\infty = (2.5 - 5.0)$  va  $\eta = (0.01 - 0.14)$  uchun ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki,  $z=6$  va  $\varepsilon_\infty < 3$  bo'lganda ushbu kuprat materiallarda kuchsiz legirlangan rejimdan o'ta legirlangan rejimgacha oraliqda yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar sodir bo'ladi.



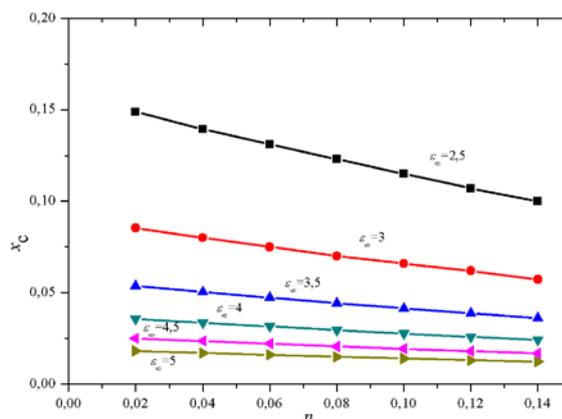
**1-rasm. LSCO va LBCO dagi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarga mos tok tashuvchilarning kritik konsentratsiyasining  $x_c$  ( $z=6$  bo'lganda)  $\eta$  va  $\varepsilon_\infty$  ga bog'liq ravishda o'zgarishi**

LSCO va LBCO da  $\eta$  ning kamayishi bilan  $x_c$  ning o'zgarishi 2-rasmda  $z=8$ ,  $\varepsilon_\infty = (2.5 - 5.0)$  va  $\eta = (0.01 - 0.14)$  uchun ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki,  $z=8$  va  $\varepsilon_\infty < 3$  da ushbu kuprat materiallarida yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar kuchsiz legirlangan rejimdan o'ta legirlangan rejimgacha oraliqda sodir bo'ladi.



**2-rasm. LSCO va LBCO dagi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarga mos tok tashuvchilarning kritik konsentratsiyasining  $x_c$  ( $z=8$  uchun)  $\eta$  va  $\varepsilon_\infty$  ga bog'liq ravishda o'zgarishi**

LSCO va LBCO da  $\eta$  ning kamayishi bilan  $x_c$  ning o'zgarishi 3-rasmda  $z=12$ ,  $\epsilon_\infty = (2.5 - 5.0)$  va  $\eta = (0.01 - 0.14)$  uchun ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki,  $z=12$  va yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar ushbu kuprat materiallarda kuchsiz legirlangan rejimdan optimal legirlangan rejimgacha oraliqda sodir bo'ladi.



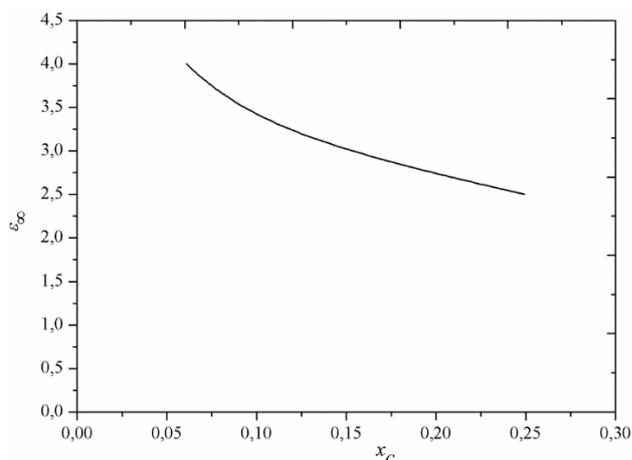
**3-rasm. LSCO va LBCO dagi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlariga mos tok tashuvchilar kritik konsentratsiyasining  $x_c$  ( $z=12$  uchun)  $\eta$  va  $\epsilon_\infty$  ga bog'liq ravishda o'zgarishi**

Biz bir zaryad tashuvchiga ega bo'lgan katta radiusli kirishmali legirlangan lantan kupratlarda metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlarning yangi mexanizmlarini amalga oshirish imkoniyatlarini o'rgandik. 1- va 2-rasmlarda  $\epsilon_\infty = 2.5$ ,  $\eta = 0.02$  va  $z=6$  va  $8$  uchun keltirilgan nazariy natijalarimiz shuni ko'rsatadiki, eksperimental tadqiqotlarda qayd etilganidek, LSCO va LBCOda yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar chuqur o'ta legirlangan sohada ( $x_c \gtrsim 0.2$ ) sodir bo'ladi.

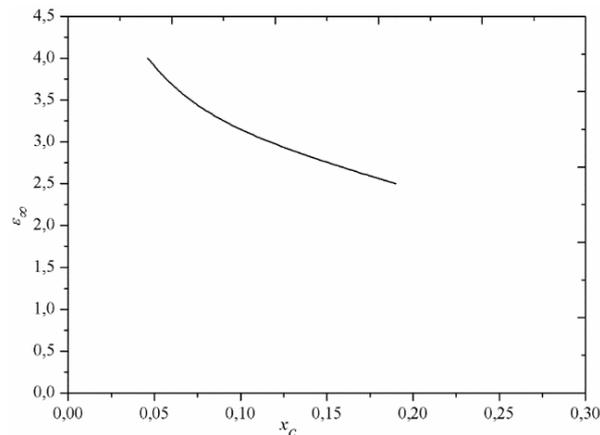
Dissertatsiyaning “**Yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar va ularning kam legirlangan va optimal legirlangan kupratlarda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikka ta'siri**” deb nomlangan uchinchi bobida deformatsiyalangan kristall panjarali kupratlar sohalarida akustik va optik fonon tebranishlari bilan legirlangan kovaklarning nuqsonsiz o'zaro ta'siri o'rganilgan. Shuningdek, ushbu materiallarda yangi metall-o'ta o'tkazgich va o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar va ularning yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikka ta'siri ko'rib chiqilgan. Qutbli kuprat materiallariga legirlash yo'li bilan kiritilgan kvazierkin kovak tashuvchilar panjara tebranishlari bilan kuchli o'zaro ta'sirda avtolokallashadi va shuning uchun ushbu legirlangan kovak tashuvchilar panjaraning lokal buzilishlari bilan o'rab olinadi va effektiv massalari  $m_p \simeq (2 - 3)m_e$  (bu yerda  $m_e$ - erkin elektron massasi) bo'lgan katta polyaronlarga aylanadi. Legirlash darajasi ma'lum bir kam legirlash rejimiga ko'tarilganda, legirlangan kuprat materiali dielektrik holatdan metall holatga o'tishi mumkin.  $T_c$  dan pastda bunday metall-dielektrik o'tish o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tish sifatida sodir bo'ladi. Legirlangan kupratlarda metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishning yangi mezonini quyidagicha yozish mumkin

$$x \gtrsim x_c = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3 n_a} [2m_p E_p]^{\frac{3}{2}}. \quad (13)$$

Endi  $La$  va  $Y$  ( $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  va  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ) asosidagi yuqori haroratli kupratlarda metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar uchun  $x_c$  kritik legirlash darajalarini hisoblaymiz. Bunda biz  $\epsilon_\infty = 2.5 - 4.0$  va  $\eta = 0.04$  da  $E_p \simeq (0.078 - 0.2)$  eV ning hisoblangan qiymatlarini va  $m_p \simeq (2 - 3)m_e$  ning eksperimental qiymatlarini olamiz. Keyinchalik,  $\epsilon_\infty$  ning LSCO va YBCO da  $x_c$  kamayish bilan o'zgarishi  $\eta = 0.04$  uchun 4 va 5-rasmlarda ko'rsatilgan.



**4-rasm. LSCOda  $\eta = 0.04$  uchun  $\epsilon_\infty$  ning kamayishi bilan  $x_c$  ning o'zgarishi**



**5-rasm. YBCOda  $\eta = 0.04$  uchun  $\epsilon_\infty$  ning kamayishi bilan  $x_c$  ning o'zgarishi**

Yuqorida keltirilgan metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar uchun nazariy natijalar kam legirlangan va optimal legirlangan kupratlardagi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlar bo'yicha eksperimental ma'lumotlar bilan yaxshi mos keladi. Xususan, bizning natijalarimiz shuni ko'rsatadiki, YBCO da metall/o'ta o'tkazuvchan-dielektrik o'tishlar va fazalarning raqobatlashuvchi metall/o'ta o'tkazuvchan-dielektrik fazalarga bo'linishi eksperimental kuzatuvlarga muvofiq  $0.05 \lesssim x_c \lesssim 0.19$  legirlash diapazonida sodir bo'ladi.

Dielektrik va metall/o'ta o'tkazuvchan fazalar kam legirlangan va optimal legirlangan YuHO'O' kupratlarda raqobatlashadi, bu yerda  $T_c$  dan pastda o'ta o'tkazuvchan bo'lmagan (ya'ni harakatsiz) va o'ta o'tkazuvchan kovakli tok tashuvchilar mos ravishda tok tashuvchilari kam (dielektrik) va tok tashuvchilarga boy (o'ta o'tkazuvchan) sohalarida joylashgan. Yetarlicha keng polyaron zonasida joylashgan kovakli tok tashuvchilar harakatchan bo'lishi mumkin va ularning Kuper juftlashishi impuls ( $k$ -) fazosida sodir bo'ladi va  $T_c$  dan yuqorida polyaron (ya'ni kuchli bog'langan) Kuper juftlarini hosil qiladi, ular o'zlarini boz-zarrachalar kabi tutadi va  $T_c$  dan pastda o'ta oquvchan holatga kondensatsiyalanadi. Aslida, bunday oldindan hosil bo'lgan Kuper juftliklari legirlangan yuqori haroratli kupratlarda  $\epsilon_F \sim \epsilon_A$  (bu yerda  $\epsilon_F$  Fermi energiyasi va  $\epsilon_A$  - ikkita polyaron tashuvchilar orasidagi tortishish energiyasi) da mavjud bo'ladi.

Chunki  $\{-\varepsilon_A, \varepsilon_A\}$  energiya oralig'ida katta polaronlar o'rtasidagi juft o'zaro ta'sir mexanizmi oddiy BKSh modeliga qaraganda ancha kuchli.

Bu holda kuchli o'zaro ta'sirlashuvchi polaron fermi-gazning juft gamiltoniani Fermi operatorlarining Bogolyubov almashtirishi yordamida diagonallashtirilishi mumkin. Keyin poloyaronlararo o'zaro ta'siri modeli potentsialidan foydalanish va polaronlarning Kuper juftlashish haroratini  $T^*$  aniqlash uchun quyidagi BKSh-simon tirqish tenglamasini olish mumkin:

$$\frac{1}{\lambda_F} = \frac{1}{D(\varepsilon_F)\tilde{V}_F} = \int_0^{\varepsilon_A} d\xi \frac{\tanh \frac{\sqrt{\xi^2 + \Delta_F^2(T)}}{2k_B T}}{\sqrt{\xi^2 + \Delta_F^2(T)}}, \quad (14)$$

bunda  $\xi = \varepsilon(k) - \varepsilon_F$  - katta polaronlarning Fermi energiyasi bo'yicha o'lchangan energiyasi  $\varepsilon_F$ ,  $\varepsilon(k)$  - bu polaronlarning kinetik energiyasi,  $\lambda = D(\varepsilon_F)\tilde{V}_F$  - BKSh-simon bog'lanish doimiysi,  $D(\varepsilon_F)$  - Fermi sirtidagi holatlar zichligi,  $\tilde{V}_F = V_A - V_C$ ,  $\tilde{V}_F = V_C/[1 + D(\varepsilon_F)V_C \ln(\varepsilon_C/\varepsilon_A)]$  - ikkita fermion o'rtasidagi ekranlangan kulon o'zaro ta'siri,  $V_A$  va  $V_C$  - fermionlar orasidagi tortishish potentsiali,  $\varepsilon_C$  va  $\varepsilon_A$  kesish energiyasiga mos keluvchi Kulon o'zaro ta'sir potentsiali,  $\Delta_F(T)$  - BKSh-simon tirqish.

Agar  $\varepsilon_A \gg k_B T^*$  bo'lsa, (14) tenglamani quyidagicha yozamiz

$$k_B T^* \approx 1.134 \varepsilon_A e^{-\frac{1}{\lambda_F}}, \quad (15)$$

Kam legirlangan va optimal legirlangan YuHO'O' kupratlarning Fermi energiyasi  $\varepsilon_F \approx (0.1 - 0.3)$  eV past bo'ladi. Bu materiallar uchun  $\varepsilon_A = E_p + \hbar\omega_0$  deb qabul qilish mumkin, bu yerda  $\hbar\omega_0$  - optik fononlar energiyasi. Kam legirlangan kupratlar uchun  $\lambda_F \approx 0.4$  va  $\varepsilon_A \approx 0.15$  eV deb ( $E_p \approx 0.1$  eV va  $\hbar\omega_0 \approx 0.05$  eV) faraz qilib, bunday yuqori haroratli kupratlarda  $T^*$  uchun o'tkazilgan tajriba natijalariga to'liq mos  $T^* \approx 162K \gg T_c$  (kam legirlangan  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  va  $Bi_2Si_2CaCu_2O_{8+\delta}$  kupratlar uchun mumkin bo'lgan  $T_c$  qiymatlari mos ravishda 90 K va 100 K dan kichik bo'ladi) ekanligini topamiz. Agar kam legirlangan va optimal legirlangan YuHO'O' kupratlarda hosil bo'lgan polaron Kuper juftliklari o'zini bozonlar kabi tutsa, ularning o'tao'tkazuvchanlik holatiga o'tishi BKSh-simon fermi-suyuqlik o'tao'tkazuvchanlik nazariyasi bilan tavsiflanmaydi. Ushbu materiallarda BKSh nazariyasi  $T_c$  ni aniqlash uchun yaroqsiz bo'lib qoladi. Faqat o'ta o'tkazuvchanlikning muqobil nazariyasi (boze-suyuqlik) kam legirlangan va optimal legirlangan kupratlarda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikni tavsiflash uchun yetarli bo'lishi mumkin. Bunday nazariyaga ko'ra,  $\gamma_B \ll 1$  da YuHO'O'-kupratlarda o'tao'tkazuvchanlikning kritik harorati  $T_c$  quyidagi munosabatdan aniqlanadi

$$T_c^{max} \approx T_{BEC} \left[ 1 + c\gamma_B \sqrt{k_B T_{BEC} / \xi_B} \right] \quad (16)$$

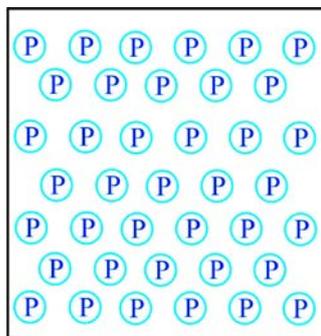
bunda  $T_{BEC} = 3.31\hbar^2\rho_B^{2/3}/2k_Bm_B$  - polaronli Kuper juftliklari ideal boze-gazining Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi harorati,  $\rho_B$  - tortishuvchi bozonlar zichligi,  $m_B = 2m_p$  - bozon Kuper juftlarining massasi,  $k_B$  - Bolsman doimiysi,  $\xi_B$  - tortishuvchi bozon Kuper juftlarini o'z ichiga olgan kondensatsiya qatlamining xarakterli qalinligi,  $c = \pi^{3/2}/3.918$ ,  $\gamma_B \ll 1$ .

Taklif etilayotgan o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tish va raqobatlashuvchi o'ta o'tkazuvchan va dielektrik fazalar evolyutsiyasining mikroskopik modelida legirlash darajasining ortishi bilan kam legirlangan kupratlardagi dielektrik sohalar asta-sekin torayadi, optimal legirlangan kupratlarda kichik orolchalar shaklida saqlanib qoladi va nihoyat optimal legirlash darajasidan yuqorida yo'qoladi. Ushbu real manzarada faqat metall sohalarida joylashgan Kuper juftlari  $T_c$  dan past bo'lgan o'ta oquvchan suyuqlikda kondensatsiyalanadi va yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikda ishtirok etadi, boshqa Kuper juftlari esa o'ta o'tkazuvchan fazadan dielektrik fazaga o'tishi tufayli zaryad tashuvchilar kam bolgan sohaga lokalizatsiya qilinadi va shuning uchun harakatsiz va o'ta o'tkazuvchanlikda qatnashmaydi. YuHO'O' kupratlarda (16) ifodadan aniqlanadigan o'ta o'tkazuvchanlikka o'tish kritik harorati o'talegirlash rejimiga yaqin bo'lgan, ushbu legirlash darajasida dielektrik sohalar yo'qoladi va optimal legirlangan rejimda  $T_c^{max}$  maksimumga erishadi. Ammo legirlash darajalari  $x_c \lesssim 0.16$  bo'lganda  $T_c$  kritik harorat  $T_c^{max}$  dan kichik bo'lib qoladi va quyidagi munosabatdan aniqlanadi

$$T_c = \frac{V_S}{V_S + V_I} T_c^{max}, \quad (17)$$

bunda  $V = V_I + V_S$ - kupratlardagi dielektrik va o'ta o'tkazuvchan sohalarining umumiy hajmi,  $V_I$ - kupratlardagi dielektrik sohalar hajmi,  $V_S$ - bu materialarning o'ta o'tkazuvchanlik sohalar hajmi.

Agar  $V_I = V$  va  $V_S = 0$  bo'lsa, u holda kuchsiz legirlangan kupratlardagi ( $x_c \leq 0.02$ ) polyanonlar (P) harakatsiz va o'ta o'tkazuvchanlikda ishtirok etmaydi (6a-rasmga qarang).

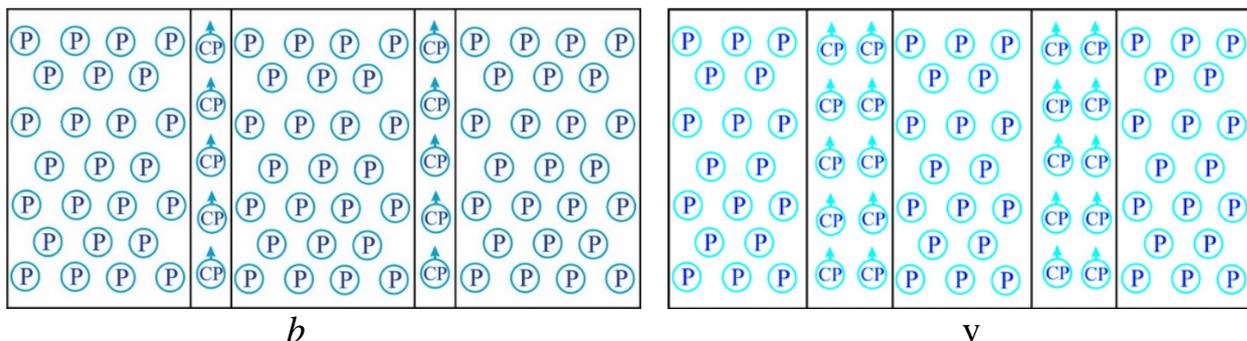


**6a-rasm. Kuchsiz legirlangan kupratlarning barcha hajmlarida harakatsiz polyanon tashuvchilarning mavjudligini ko'rsatadigan sxematik ko'rinish**

$V_I \gg V_S$  da kuchsiz legirlangan kupratlarda ( $0.02 < x_c < 0.05$ ) harakatsiz polyanonlar (P) va harakatchan (o'ta o'tkazuvchan) Kuper juftliklari (CP) keng

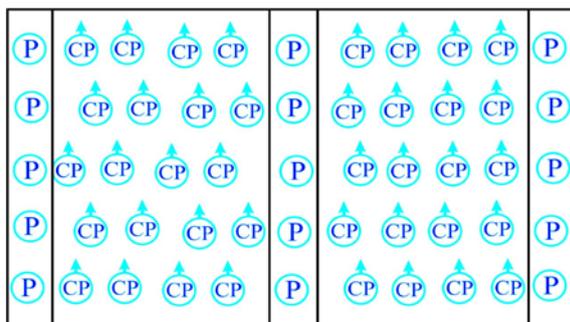
dielektrik sohalarda (zonalar) va ingichka o'ta o'tkazuvchan sohalarda (zonalar) mavjud bo'ladi (6b-rasmga qarang).

$V_I > V_S$  da kam legirlangan kupratlarda ( $0.05 < x_c < 1/8$ ) harakatsiz polyaronlar (P) va harakatchan (o'ta o'tkazuvchan) CP lari mos ravishda nisbatan ingichka dielektrik sohalarda (zonalarda) va nisbatan keng o'ta o'tkazuvchan sohalarda (zonalarda) mavjud bo'ladi (6v-rasmga qarang).



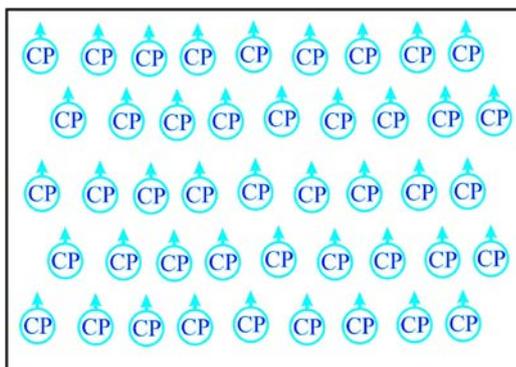
**6(b,v)-rasm. (b) -  $V_I \gg V_S$  da kuchsiz legirlangan kupratlarda ( $0.02 < x_c < 0.05$ ), (v) -  $V_I > V_S$  da kam legirlangan kupratlarda ( $0.05 < x_c < 1/8$ ) harakatsiz polyaronlar (strelkalarsiz) va o'ta o'tkazuvchan CPlari (strelkalar bilan) mavjud bo'lgan sohalarni ko'rsatuvchi sxematik ko'rinish**

$V_I \ll V_S$  da bir oz kam legirlangan kupratlarda ( $x_c > 1/8$ ) harakatsiz polyaronlar (P) va harakatchan (o'ta o'tkazuvchan) CP lari mos ravishda ingichka dielektrik sohalarda (zonalarda) va keng o'ta o'tkazuvchan sohalarda (zonalarda) mavjud bo'ladi (6g-rasmga qarang).



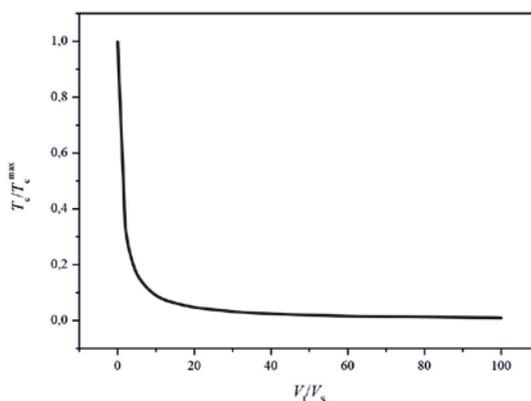
**6g-rasm.  $V_I \ll V_S$  da biroz kam legirlangan kupratlarda ( $x_c > 1/8$ ) harakatsiz polyaronlar (strelkalarsiz) va o'ta o'tkazuvchan CPlari (strelkalar bilan) mavjud bo'lgan sohalarni ko'rsatuvchi sxematik ko'rinish**

Agar  $V_I = 0$  va  $V_S = V$  bo'lsa, u holda polyaronlar (P) bozon Kuper juftlariga bog'langan bo'lib, ular optimal legirlangan kupratlarda ( $x_c \gtrsim 0.15$ ) butun hajmda o'ta o'tkazuvchan CP lariga aylanadi (6d-rasmga qarang).



**6d-rasm. Optimal legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda butun hajmda o‘ta o‘tkazuvchan CPLari (strelkalar bilan) mavjudligini ko‘rsatuvchi sxematik ko‘rinish ( $x_c \gtrsim 0.15$ )**

Dielektrik hajm ulushi  $V_I/V_S$  bo‘lgan YuHO‘O‘ kupratlarida  $T_c/T_c^{max}$  nisbatining o‘zgarishi 7-rasmda ko‘rsatilgan.



**7-rasm.  $V_I/V_S$  ortishi bilan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda  $T_c/T_c^{max}$  o‘zgarishi**

Endi (16) ifodadan foydalanib, optimal legirlangan YBCO dagi  $T_c^{max}$  qiymatini baholashimiz mumkin. Faraz qilaylik,  $m_B = 4m_e$ ,  $\gamma_B = 0.25$ ,  $k_B T_{BEC}/\xi_B \approx 0.15$  va  $\rho_B \approx 6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , optimal legirlangan YBCO uchun  $T_{BEC} \approx 81 \text{ K}$  va  $T_c^{max} \approx 92 \text{ K}$  ni topamiz. Kam legirlangan YBCO ( $x \lesssim 0.14$ ) sistemasi uchun  $f_I = V_I/V_S = 0.25$  deb qabul qilish mumkin. U holda biz  $T_c = T_c^{max}/1.25 \approx 74 \text{ K}$  ni olamiz, bu YBCO uchun olingan nazariy natijalar eksperimental ma’lumotlarga mos keladi. YBCO da  $f_I$  dielektrik hajmining ulushi  $x > 0.15$  da yetarlicha kichik va  $T_c$   $x_{UD} \approx 0.15$  va  $x_{OD} \approx 0.16$  oralig‘ida kam o‘zgaradi. Ushbu taxmin qilingan  $T_c$  holati YBCO da ham tajribada kuzatiladi.

Agar kam legirlangan LSCO da  $V_I/V_S$  nisbati  $x \lesssim 0.13$  da 0.2 tartibida deb faraz qilsak, u holda biz  $T_c \approx 0.83 T_c^{max} \approx 32 \text{ K}$  ni olamiz, bu tajriba natijalariga yaxshi mos keladi (masalan,  $x=0.13$  da  $T_c$  qiymati taxminan 32 K ni tashkil qiladi). Kam legirlangan va optimal legirlangan kupratlarda metall/o‘ta o‘tkazuvchan sohalarining bir qismi  $x < 0.16$  legirlash darajasida dielektrik holatlarga o‘tadi. Shuning uchun kam legirlangan kupratlarda kuchli polaron effekti va o‘ta o‘tkazuvchan sohalar hajmi hisobiga dielektrik hajm ulushining

ortishi tufayli o'ta o'tkazuvchanlikning sezilarli darajada pasayishi kuzatiladi. Eksperimental natijalar ham shuni ko'rsatadiki, o'ta legirlangan rejimga qarab legirlashning ortishi bilan polaron effekti susayadi. Bu shuni anglatadiki, optimal legirlangan rejimda o'ta o'tkazuvchanlik polaron effektining susayishi va (16) ifodaga kiruvchi  $m_p$  polaronlar massasining kamayishi tufayli kuchayadi.

Kupratlarda kuchli elektron (kovak) -fonon o'zaro ta'siri kam legirlangan kupratlarda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikka to'sqinlik qiluvchi zaryad zichligi to'lqinining hosil bo'lishiga olib keladi. Zaryad zichligi to'lqinining hosil bo'lishi panjaraning buzilishi bilan birga keladi va polaronlarning hosil bo'lishiga o'xshaydi. Bundan tashqari, nurlanish tufayli yuzaga kelgan tartibsizliklar (ya'ni panjara nuqsonlari) kupratlarda  $T_c$  ga kuchli ta'sir ko'rsatishi va o'ta o'tkazuvchanlikni kuchaytirishi mumkin, chunki anion vakansiyasi tomonidan kuchaytirilgan Kulon itarilishi polaronlarning hosil bo'lishiga to'sqinlik qiladi.

Haqiqatdan ham,  $La_{1.875}Ba_{0.125}CuO_4$  kuprat o'ta o'tkazgichda proton bilan nurlantirish natijasida hosil bo'lgan tartibsizlik zaryad zichligi to'lqini holatini susaytirish bilan bir vaqtda o'ta o'tkazuvchan kritik harorat  $T_c$  ni 50% ga oshirishi eksperimental ravishda aniqlandi.

## XULOSA

“Kovakli legirlangan  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  va lantan asosli kupratlarda metall-dielektrik o'tishlar va ularning yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikka ta'siri” mavzusidagi fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi asosiy xulosalar taqdim etildi:

1. Lantan asosidagi kuprat o'ta o'tkazgichning ikki tashuvchili modeli taklif etildi, bunda metall-dielektrik o'tishlari dastlab legirlanishning nisbatan ingichka intervalida ( $0.07 < x \leq 0.14$ ) kirishmasiz sohalarda, so'ngra keng legirlanish sohalarda ( $0.1 < x \leq 0.2$ ) kichik radiusli kirishmalar bo'lgan sohalarda sodir bo'ladi.

2. Bir tok tashuvchili lantan kupratlarida kuchli kovak-panjara o'zaro ta'siri va polaron effektlar bilan boshqariladigan yangi metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlari  $\epsilon_\infty$  qiymati 5.0 dan 2.5 gacha pasayganda keng legirlanish oralig'ida sodir bo'lishi aniqlandi.

3. Birinchi marta YHO'O' materiallarida  $\epsilon_\infty$  va  $\eta$  (masalan,  $\epsilon_\infty < 3$  va  $\eta \leq 0.02$  uchun) qiymatlariga va polaron tartiblash turlariga (ya'ni  $z=6, 8$  va  $12$ ) qarab, metall/o'ta o'tkazgich-dielektrik o'tishlari o'talegirlangan sohalarda ( $x > 0.16$ ) katta polaronlarning  $E_p$  bog'lanish energiyasining 0.05 eV ( $\epsilon_\infty = 5.0$ ) dan 0,2 eV ( $\epsilon_\infty = 2.5$ ) gacha keskin oshishi tufayli sodir bo'lishi ko'rsatildi.

4. YHO'O' kupratlarda kam legirlangan rejimdan optimal legirlangan rejimgacha oraliqda kritik haroratning oshishi, legirlanish darajasining ortishi bilan polaron effektining zaiflashishi va optimal legirlangan kupratlarda bu ta'sirning yo'qolishi tufayli ro'y berishi ko'rsatildi, bunda legirlangan YuHO'O' kupratlarda kuchli elektron (kovak)- fonon o'zaro ta'sirida (polaron effekti) polaronlar yoki zaryad zichligi to'lqini hosil bo'lishi tufayli yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik

kritik haroratining kamayishiga olib keladi, bu esa kam legirlangan kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlik hodisasiga teskari ta'sir ko'rsatadi.

5. Legirlangan YuHO'O' kupratlarda nurlanish paytida yuzaga keladigan kristall panjaradagi buzilishlar yoki nuqsonlar (xususan, anion vakansiyalari) o'ta o'tkazuvchanlikka o'tish kritik haroratiga kuchli ta'sir ko'rsatishi va ulardagi o'ta o'tkazuvchanlikni kuchaytirishi mumkinligi aniqlandi, bunda kupratlardagi anion vakansiyalari ulardagi kovak tashuvchilarning Kulon itarish kuchini ortishi hisobiga polaronlar va polaron Kuper juftlarining hosil bo'lishiga to'sqinlik qilishi proton bilan nurlantirilgan  $La_{1.875}Ba_{0.125}CuO_4$  YHO'O' kupratlarda aniqlangan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**  

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**ЖУМАБАЕВА ГУЛМИРА КАИРБАЕВНА**

**МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК ПЕРЕХОДЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНУЮ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В ДЫРОЧНО  
ЛЕГИРОВАННЫХ КУПРАТАХ НА ОСНОВЕ ЛАНТАНА И  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$**

**01.04.07 – физика конденсированного состояния**

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

**Ташкент – 2025**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистана за номером B2024.2.PhD/FM1108.**

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) и на Информационно-образовательном портале “Ziynet” ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Курбанов Улугбек Тажибаевич</b> доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Рахимов Абдулла Маннабович</b> доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник <b>Явидов Бахрам Янгибаевич</b> доктор физико-математических наук, доцент
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова</b>

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики; тел. (+99871) 289-31-41; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер \_\_\_\_\_). (100124, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.  
(Реестр протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2025 г.)

**М.Ю. Ташметов**  
председатель Научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**О.Р. Тожибоев**  
ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
PhD ф.-м.н., старший научный сотрудник

**Э.М. Турсунов**  
председатель научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время актуальными проблемами современной физики являются проблемы высокотемпературной сверхпроводимости и металл-диэлектрик переходов в легированных меднооксидных (купратных) сверхпроводниках и в родственных конденсированных системах. Решение этих наиболее важных и сложных проблем не представляется возможным без построения адекватной количественной теории электронных процессов в таких высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП)-купратах, а также без всестороннего изучения металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов и механизмов формирования и разделения диэлектрических, металлических и сверхпроводящих фаз в различных ВТСП-материалах. Изучение данных переходов в легированных купратах способствует более глубокому пониманию механизмов высокотемпературной сверхпроводимости. Теории переходов металл-диэлектрик в твердых телах могут быть развиты на основе единой унифицированной модели, включающей концепции локализованных и делокализованных состояний носителей тока, представленных заряженными квазичастицами (электронами или дырками).

Современные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что электронные свойства недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных ВТСП-купратов существенно отличаются от свойств традиционных диэлектриков, металлов и сверхпроводников. На основе этих исследований возникают не только новые знания о металл-диэлектрик переходах и сверхпроводящих переходах в легированных ВТСП-купратах, но и создаются перспективные ВТСП-материалы с высокими критическими температурами сверхпроводящего перехода  $T_c$ , которые могут найти практическое применение в энергетике и различных областях техники. Поэтому, исследования возможности металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов и их воздействия на критическую температуру сверхпроводящего перехода  $T_c$ , сосуществования металлических/сверхпроводящих и диэлектрических фаз в легированных ВТСП-купратах являются необходимыми для понимания механизмов этих взаимосвязанных фундаментальных явлений.

В Республике Узбекистан активно развиваются области полупроводникового и сверхпроводникового материаловедения, при этом особое внимание уделяется определению природы локализованных дырочных носителей тока и возможных механизмов переходов металл/сверхпроводник-диэлектрик в легированных ВТСП-купратах. Эти фундаментальные исследования, имеющие большое значение для дальнейшего научного прогресса и практического применения, находят отражение в Стратегии<sup>2</sup> развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

---

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

Исследования в данной области соответствуют целям и задачам, установленным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-2772 «О приоритетных направлениях развития электротехнической промышленности в 2017–2021 годах» от 13 февраля 2017 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой области.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** Исследованиями металл-диэлектрик переходов в дырочно легированных купратах занимались и занимаются многие исследователи в мире, в том числе российские (L.D.Landau, S.I.Pekar, D.I.Khomsky, A.S.Alexandrov, V.F.Gantmakher, E.G.Maksimov, S.G.Ovchinnikov и др.), украинские (A.L.Solovjov, R.V.Vovk и др.), германские (G.Fröhlich, H.Hess, F.Hensel и др.), английские (R.Peierls, N.F.Mott, A.Wilson, J.Hubbard, D.M.Egles, P.P.Edwards, R.L.Johnston, A.Carrington, J.W.Loram, T.Rice и др.), бельгийские (J.T.Devreese), японские (Y.Toyozawa, S.Uchida, Y.Koike, S.Ono, Y.Ando, M.Ido, A.Matsuda, T.Kato и др.), американские (R.Feynman, T.Holstein, P.W.Anderson, S.A.Kivelson, P.A.Lee, C.M.Varma, J.Devreyses, D.Emin, L.N.Cooper, W.J.Emery и др.), узбекистанские (S.Dzhumanov, B.Ya.Yavidov, P.J.Baymatov, B.Abdullaev, U.T.Kurbanov и др.) и другие специалисты.

Эти вопросы имеют долгую историю, начиная с 1933 года, когда Ландау, объясняя свойства F-центров (анионная вакансия с захваченным электроном) в щелочно-галогидных кристаллах, выдвинул концепцию автолокализации электрона. В период с 1931 по 1958 годы такие ученые, как А. Вильсон, Н. Ф. Мотт, Ф. Вигнер, Р. Пайерлс и Ф. В. Андерсон, занимались объяснением перехода от делокализованного состояния электронов к локализованному и предложили различные теории металл-диэлектрик переходов. Среди них можно выделить: перекрытие полностью заполненной валентной зоны с вышележащей незаполненной зоной (переход Вильсона), влияние сильной электронной корреляции, включая кулоновское отталкивание двух электронов в одном атоме или ионе кристаллической решетки (переход Мотта), кристаллизацию электронного газа (переход Вигнера), искажение одномерной кристаллической решетки и удвоение её периода (переход Пайерлса), а также неупорядоченность решетки (переход Андерсона). В последующие десятилетия эти концепции были развиты при исследовании явлений локализации и делокализации носителей тока, а также металл-диэлектрик переходов в различных классах твердых тел, включая

оксидные материалы и легированные полупроводники. В частности, идеи металл-диэлектрик переходов Мотта и Андерсона получили дальнейшее развитие в исследованиях физиков, работающих в области оксидных диэлектриков и легированных полупроводников, таких как J. Hubbard, O. Madelung, M. I. Klinger, J. R. Kallen, E. R. Kallen, J. Kanamori, J. Zaanen, G. A. Savatski, J. V. Allen, B. I. Shklovskiy, A. L. Efros, G. Kotliar и V. Dobrosavljevik. С открытием новых легированных медно-оксидных (купратных) ВТСП материалов продолжились исследования проблем локализации носителей тока и металл-диэлектрик переходов в этих сложных системах с применением современных методов и подходов (M. Imada, P. Klemerial, J. Fink, A. N. Lavrov, V. F. Gantmakher, G. S. Boebinger, Y. Endo, S. Castellani, P. A. Magette, J. B. Su, Yu Li, S. Ono, S. Djumanov).

Несмотря на обширные теоретические исследования, механизмы локализации и делокализации дырочных носителей тока, а также переходов между металлическим/сверхпроводящим и диэлектрическим состояниями в легированных ВТСП-купратах остаются недостаточно изученными. Точные количественные критерии этих переходов до сих пор не определены, что затрудняет их полное понимание. Кроме того, в теоретических работах по локализации носителей тока и металл/сверхпроводник-диэлектрик переходам в ВТСП-материалах не уделялось должного внимания влиянию необычных электрон-дефект-фононных взаимодействий, сильного электрон-фононного взаимодействия и поляронных эффектов, которые могут играть важную роль в этих процессах.

**Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по теме: «Электронная теория ВТСП-купратов и её применение в исследованиях образования и наномасштабного разделения диэлектрических/металлических и сверхпроводящих фаз в этих системах» (2020–2024).

**Целью исследования** является определение механизмов локализации одного и двух типов носителей тока и реализации новых металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в легированных ВТСП-купратах и их влияние на критическую температуру  $T_c$  сверхпроводящего перехода в них.

**Задачи исследования:**

установить механизмы металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в легированных купратах, вызванные сильными электрон-фононными и электрон-примесь-фононными взаимодействиями, на основе двухносительной модели купратных сверхпроводников;

определить новые критерии металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов от недолегированных до сверхлегированных режимов в легированных оксидных ВТСП материалах;

продемонстрировать разделение и сосуществование металлических/сверхпроводящих и диэлектрических фаз в недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратах;

определить влияние металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов на критическую температуру сверхпроводящего перехода в недолегированных и оптимально легированных оксидных ВТСП материалах и причины подавления и усиления сверхпроводимости в них.

**Объектом исследования** являются недолегированные, оптимально легированные и сверхлегированные купраты  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  (LBCCO),  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  (LNSCO),  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  (LBCO),  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  (LSCO) и  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO).

**Предметом исследования** являются процессы локализации и делокализации одного и двух типов носителей заряда, новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы в ВТСП-купратах с разной степенью легирования и их влияние на  $T_c$ .

**Методы исследований:** вариационные методы, адиабатическое приближение и континуальная модель собственной и несобственной автолокализации носителей, метод сильной связи, компьютерная графика (Mathematica, OriginPro 8, CorelDRAW).

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

показано, что в рамках двухносительной модели купратных сверхпроводников  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  и  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  металл-диэлектрик переходы происходят от недолегированного до оптимально легированного режима в областях без примесей, а затем в областях с примесями малых радиусов при оптимально легированном и сверхлегированном режимах;

установлено, что в дырочно-легированных  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  и  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  купратах реализация новых металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов, обусловленных сильными дырочно-фононными взаимодействиями и поляронными эффектами, зависит от величины диэлектрической восприимчивости  $\epsilon_\infty$  и энергии связи поляронов; эти переходы наблюдаются в диапазоне от недолегированного до сверхлегированного режимов;

выявлено влияние металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов на критическую температуру сверхпроводящего перехода в недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратах  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ ,  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  и  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , а также установлены причины подавления и усиления сверхпроводимости в этих материалах;

показано, что в ВТСП-купратах критическая температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  увеличивается от недолегированного до оптимально легированного режима с ростом доли сверхпроводящей фазы и снижением доли диэлектрической фазы, обусловленных ослаблением

поляронного эффекта в недолегированных купратах и его исчезновением в оптимально легированных купратах.

**Практические результаты исследования заключаются в следующем:**

разработана теория новых металл-диэлектрик переходов в легированных купратных материалах с двумя типами дырочных носителей;

получены формулы для критериев новых металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов и их влияния на критическую температуру  $T_c$  сверхпроводящего перехода в легированных купратах.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается использованием проверенных математических методов и физических моделей для описания процессов автолокализации носителей заряда вблизи примесей и в условиях деформируемой кристаллической решетки, а также модели Мотта–Хаббарда и согласованностью полученных результатов с существующими экспериментальными данными.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость работы заключается в расширении физических представлений о локализации и делокализации одного и двух типов дырочных носителей заряда, а также металл/сверхпроводник-диэлектрик переходах.

Практическая значимость определяется тем, что развитая теория новых металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в легированных ВТСП-материалах позволяют предсказать возможные пути создания оксидных ВТСП материалов с улучшенными электронными свойствами.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов по исследованию одного и двух типов носителей заряда металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов и их влияния на высокотемпературную сверхпроводимость в дырочно легированных купратах:

результаты по двухносительной модели купратных сверхпроводников  $La_{2-x}Ba_xCa_yCuO_4$  и  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$ , а также влияния металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов на критическую температуру сверхпроводящего перехода и установленные причины подавления и усиления сверхпроводимости в  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ ,  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  и  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  материалах используются в учебном процессе Кызыл-кийского гуманитарно-педагогического института в рамках программы по курсу «Квантовая физика» (письмо Кызыл-кийского гуманитарно-педагогического института №395 от 03.12.2024 г.). Использование результатов позволило расширить понимание студентами современных проблем физики конденсированного состояния и повысить качество их образования в области квантовой физики;

результаты по реализации новых металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов, вызванных сильными дырочно-фононными взаимодействиями и поляронными эффектами, в дырочно-легированных  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  и  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  купратах были использованы в рамках проводимых

теоретических исследований высокотемпературных сверхпроводников в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (письмо ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ №300-20/25 от 13.12.2024 г.). Использование результатов позволило оценить согласованность теоретических моделей с экспериментальными результатами, в частности расширить представления о проблемах современной физики конденсированного состояния.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследований.** По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертаций, из них 2 в зарубежных научных журналах,

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Объем диссертации составляет 116 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Электронные свойства купратных ВТСП-материалов и типы металл-диэлектрик переходов**» представлен обзор литературы, связанный с исследуемым направлением. В рамках главы анализируются электронные свойства, кристаллографическая структура и антиферромагнитные характеристики исходного купрата, а также обсуждаются возможные механизмы локализации носителей заряда и основные типы металл-диэлектрик переходов в высокотемпературных сверхпроводящих купратных материалах. В частности, проанализированы механизмы металл-диэлектрик переходов, предложенные такими исследователями, как Вильсон, Мотт, Андерсон, Пайерлс и другие. Выявлены основные нерешенные вопросы, связанные с металл-диэлектрик переходами в легированных ВТСП-купратах, обсуждены возможные подходы к их решению. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Во второй главе «Металл-диэлектрик переходы в дырочно легированных купратах на основе лантана» нами изучены возможность образования локализованных состояний дырочных носителей в легированных купратах и реализации металл металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в легированных сверхпроводниках на основе лантана с примесями малого и большого радиусов и в модели двух типов и одного типа носителей заряда.

В дырочно-легированных купратах ситуации могут быть совершенно разными для разных типов легирующих примесей. В частности, знаки констант деформационного потенциала  $E_d$  и  $E_{dD}$  для дырок и дефектов малого радиуса всегда положительны, тогда как  $E_{dD}$  для дефектов большого радиуса отрицателен.

**I.** Знаки деформационных потенциалов дырок и легирующих примесей малого радиуса положительны в  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  и  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$ , где носитель-примесь-фононные взаимодействия является притягательными вблизи легирующих примесей малого радиуса (например, вблизи ионов  $Ca^{2+}$  и  $Nd^{3+}$ ). Следовательно, дырочные носители в этих лантановых купратах автолокализуются вблизи таких примесей с образованием неводородоподобных локализованных примесных состояний, которые могут образовывать примесную зону при высоких уровнях легирования. Можно предполагать, что некоторая часть дырочных носителей будет локализована вблизи легирующих примесей малого радиуса, а другая часть дырочных носителей автолокализуются в деформируемой решетке с образованием больших поляронов. Теперь мы учитываем эти обстоятельства при изучении металл-диэлектрик переходов, связанных сильными носитель-примесь-фононными и носитель-фононными взаимодействиями в лантановых купратах с легирующими примесями малого радиуса ( $Ca^{2+}$  и  $Nd^{3+}$ ). Определим новые критерии для металл-диэлектрик переходов в модели двух носительного купратного сверхпроводника.

Естественно предположить, что примесные центры и поляроны могут образовывать сверхрешётки, а также примесные и поляронные зоны в легированных купратах. Когда два сосуществующих типа носителей заряда в легированных материалах находятся в примесной и поляронной зонах, энергия Ферми  $\varepsilon_{FI}$  носителей заряда в примесной зоне и энергия Ферми  $\varepsilon_{Fp}$  в поляронной зоне могут быть определены как

$$\varepsilon_{FI} = \hbar^2(3\pi^2 f_I n)^{2/3} / 2m_I \quad (1)$$

и

$$\varepsilon_{Fp} = \hbar^2(3\pi^2(1 - f_I)n)^{2/3} / 2m_p \quad (2)$$

где  $f_I$  - доля носителей заряда, находящихся в примесной зоне,  $m_I$  - масса таких носителей заряда,  $m_p$  - масса больших поляронов,  $n$  - концентрация легированных носителей заряда.

В модели двухносительного купратного сверхпроводника, условия локализации носителей или новые критерии для металл-диэлектрик переходов будут отличаться от критериев для металл-диэлектрик переходов, определенных в модели одноносительного купратного сверхпроводника, и могут быть записаны как

$$\frac{E_I}{\varepsilon_{FI}} = \frac{2E_I m_I}{\hbar^2 (3\pi^2 f_I n)^{2/3}} \geq 0.5 \frac{a_I}{R_I} \quad (3)$$

и

$$\frac{E_p}{\varepsilon_{Fp}} = \frac{2E_p m_p}{\hbar^2 (3\pi^2 (1 - f_I) n)^{2/3}} \geq 0.5 \frac{a_p}{R_p} \quad (4)$$

где  $E_I$  - энергия связи носителей заряда, которые связаны с примесными центрами,  $a_I$  - параметр решетки примесной сверхрешетки,  $R_I$  - радиус примесного центра,  $E_p$  - энергия связи полярона,  $a_p$  - параметр решетки поляронной сверхрешетки,  $R_p$  - радиус полярона. Теперь критерии (3) и (4) для определенного уровня легирования  $n = n_c$  могут быть записаны как

$$x = x_{cl} = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 f_I n_a} \left[ \frac{4m_I E_I R_I}{\hbar^2 a_I} \right]^{3/2} \quad (5)$$

и

$$x = x_{cp} = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 (1 - f_I) n_a} \left[ \frac{4m_p E_p R_p}{\hbar^2 a_p} \right]^{3/2} \quad (6)$$

где  $n_a = 1/V_a$  - плотность атомов решетки,  $V_a$  - объем на формульную единицу  $CuO_2$  в купратах.

Далее мы предполагаем, что примесные центры и поляроны образуют простые кубические сверхрешетки. Для простых кубических сверхрешеток примесных центров и поляронов, параметры решетки могут быть определены как  $a_I = 2R_I$  и  $a_p = 2R_p$ . Следовательно, применяя критерии (5) и (6) для переходов металл-диэлектрик к этим примесным центрам и поляронам, мы получаем следующие критические уровни легирования, соответствующие металл-диэлектрик переходам, вызванным сильными носитель-примесь-фононными и носитель-фононными взаимодействиями:

$$x_{cl} = \frac{V_a}{3\pi^2 f_I \hbar^3} [2m_I E_I]^{3/2} \quad (7)$$

и

$$x_{cp} = \frac{V_a}{3\pi^2 (1 - f_I) \hbar^3} [2m_p E_p]^{3/2} \quad (8)$$

В купратах при таких критических уровнях легирования, происходят переходы из диэлектрического состояния в металлическое или из металлического состояния в диэлектрическое.

Используя выражение (7), мы вычисляем критические уровни легирования  $x_{cl}$ , при которых металл-диэлектрик переходы, вызванные сильными носитель-примесь-решеточными взаимодействиями, происходят в  $La_{2-x}Ba_xCa_yCuO_4$  и  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$ . Результаты расчетов для  $x_{cl}$  при  $\eta=0.02$  и различных значениях  $E_I$  и  $\epsilon_\infty$  приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Рассчитанные критические уровни легирования  $x_{cl}$  при  $\eta = 0.02$  и различных значениях  $E_I$  и  $\epsilon_\infty$**

$E_I=0.1240$ эВ, $\epsilon_\infty=3.5$		$E_I=0.0943$ эВ, $\epsilon_\infty=4$		$E_I=0.0741$ эВ, $\epsilon_\infty=4.5$	
$f_I$	$x_{cl}$	$f_I$	$x_{cl}$	$f_I$	$x_{cl}$
0.5	0.213	0.5	0.141	0.5	0.098

Из этих результатов следует, что при уменьшении  $\epsilon_\infty$  металл-диэлектрик переходы происходят при более высоких уровнях легирования.

Используя выражение (8), мы вычисляем критические уровни легирования  $x_{cp}$ , при которых в  $La_{2-x}Ba_xCa_yCuO_4$  и  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  происходят металл-диэлектрик переходы, вызванные сильными дырочно-решеточными взаимодействиями. Результаты расчетов для  $x_{cp}$  при  $\eta= 0.02$  и различных значениях  $E_p$  и  $\epsilon_\infty$  приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

**Рассчитанные критические уровни легирования  $x_{cp}$  при  $\eta = 0.02$  и различных значениях  $E_p$  и  $\epsilon_\infty$**

$E_p=0.1063$ эВ, $\epsilon_\infty=3.5$		$E_p=0.0811$ эВ, $\epsilon_\infty=4$		$E_p=0.0640$ эВ, $\epsilon_\infty=4.5$	
$f_p$	$x_{cp}$	$f_p$	$x_{cp}$	$f_p$	$x_{cp}$
0.5	0.144	0.5	0.096	0.5	0.067

Как видно из таблиц 1 и 2, металл-диэлектрик переходы происходят при более высоких уровнях легирования с уменьшением  $\epsilon_\infty$  от 4.5 до 3.5.

Предложенные ранее теоретические модели не могут полностью объяснить экспериментально полученные данные, однако предложенная модель может быть использована для получения значений, хорошо согласующихся с экспериментально полученными результатами.

**II.** Если электрон-фононные взаимодействия вблизи легирующих примесей слабые, то в дырочно-легированных купратах образуются простые водородоподобные примесные центры. Такая ситуация реализуется в  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  (LSCO) и  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  (LBCO), в которых радиус как  $Sr^{2+}$  (1.31 Å), так и  $Ba^{2+}$  (1.47 Å) больше, чем у  $La^{3+}$  (1.216 Å), так что для  $Sr^{2+}$  и  $Ba^{2+}$  знак деформационного потенциала отрицательный. Из этого следует, что взаимодействия дырок с решеткой вблизи легирующих примесей большого

радиуса в LSCO и LBCO подавляются отталкивающим примесным потенциалом, а дырочные носители локализуются на расстоянии от легирующих примесей (т.е. дырочные носители слабо связаны с легирующими примесями дальнедействующим кулоновским притяжением)  $Sr^{2+}$  и  $Ba^{2+}$  и образуют водородоподобные примесные центры. Это явный случай металл-диэлектрик перехода Мотта в твердотельной модели с одним носителем, обусловленного электронной корреляцией в примесных центрах. Этот металл-диэлектрик переход может происходить только при очень низких уровнях легирования ( $x \leq 0.02$ ) в LSCO и LBCO. Кроме того, другой тип нового металл/сверхпроводник-диэлектрик перехода в этих материалах, обусловленный сильным взаимодействием дырок с решеткой, может иметь место также в твердотельной модели с одним носителем в слаболегированных, оптимально легированных и даже сверхлегированных купратах. Конкретный критерий такого нового металл/сверхпроводник-диэлектрик перехода в легированных купратах можно записать как

$$x = x_c = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 n_a} \left[ \frac{4m_p E_p R_p}{\hbar^2 a_p} \right]^{3/2}, \quad (9)$$

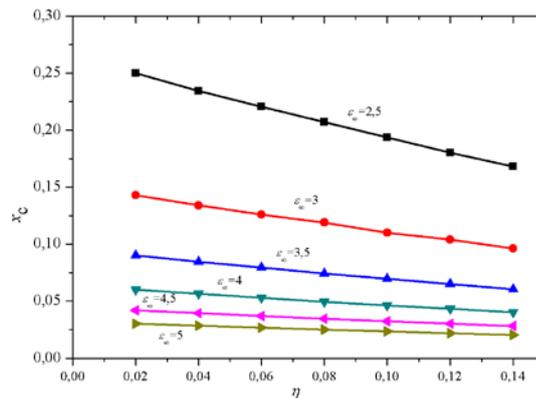
Для простых кубических, объемно-центрированных и гранецентрированных кубических сверхрешёток поляронов с различными координационными числами  $z$  постоянные решетки можно определить с помощью формул  $R_p = \frac{a_p}{2}$ ,  $R_p = \frac{\sqrt{3}}{4} a_p$  и  $R_p = \frac{\sqrt{2}}{4} a_p$ . Применяя критерий (9) для металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов, в случаях простой кубической, объемно-центрированной кубической и гранецентрированной кубической поляронных сверхрешёток можно записать:

$$x_{c1} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3 n_a} [2m_p E_p]^{3/2}, \quad z = 6 \quad (10)$$

$$x_{c2} = \frac{1}{\sqrt[4]{3}\pi^2 \hbar^3 n_a} [m_p E_p]^{3/2}, \quad z = 8 \quad (11)$$

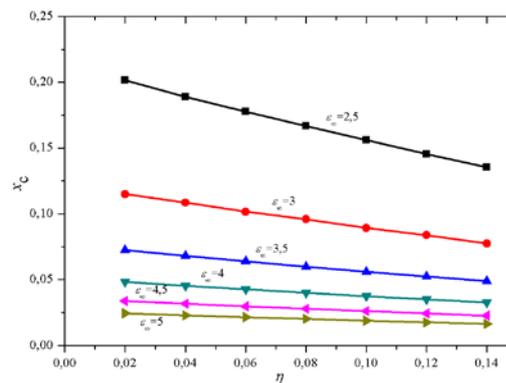
$$x_{c3} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3 n_a} [\sqrt{2}m_p E_p]^{3/2}, \quad z = 12 \quad (12)$$

Изменение  $x_c$  с уменьшением  $\eta$  в LSCO и LBCO показано на рисунке 1 для  $z=6$ ,  $\varepsilon_\infty = (2.5 - 5.0)$  и  $\eta = (0.01 - 0.14)$ . Видно, что при  $z=6$  и  $\varepsilon_\infty < 3$  в этих купратных материалах происходят новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы от слаболегированного до сверхлегированного режима.



**Рис. 1. Изменение критической концентрации носителей  $x_c$  (при  $z=6$ ), соответствующей металл/сверхпроводник-диэлектрик переходам в LSCO и LBCO, в зависимости от  $\eta$  и  $\epsilon_\infty$**

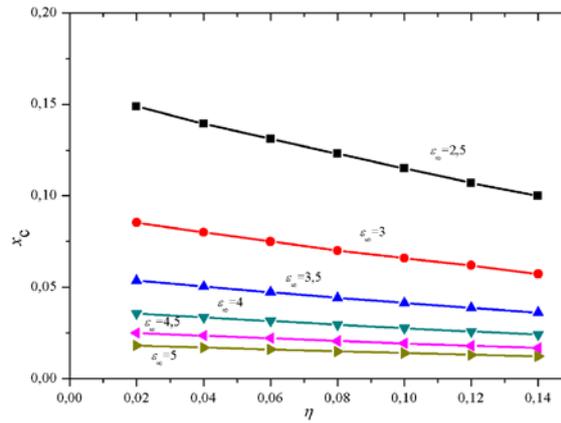
Изменение  $x_c$  с уменьшением  $\eta$  в LSCO и LBCO показано на рисунке 2 для  $z=8$ ,  $\epsilon_\infty = (2.5 - 5.0)$  и  $\eta = (0.01 - 0.14)$ . Видно, что при  $z=8$  и  $\epsilon_\infty < 3$  новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы в этих купратных материалах происходят также из слаболегированного в сверхлегированный режим.



**Рис. 2. Изменение критической концентрации носителей  $x_c$  (для  $z=8$ ), соответствующей металл/сверхпроводник -диэлектрик переходам в LSCO и LBCO, в зависимости от  $\eta$  и  $\epsilon_\infty$**

Изменение  $x_c$  с уменьшением  $\eta$  в LSCO и LBCO показано на рисунке 3 для  $z=12$ ,  $\epsilon_\infty = (2.5 - 5.0)$  и  $\eta = (0.01 - 0.14)$ . Видно, что при  $z=12$  и новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы в этих купратных материалах будут происходить от слаболегированного до оптимально легированного режима.

Нами исследованы возможности реализации новых механизмов металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в легированных лантановых купратах с примесями большого радиуса с одним носителем заряда. Наши теоретические результаты, представленные на рис. 1 и 2 для  $\epsilon_\infty = 2.5$ ,  $\eta = 0.02$  и  $z=6$  и 8, показывают, что новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы в LSCO и LBCO происходят в глубоко сверхлегированной области ( $x_c \gtrsim 0.2$ ), как сообщалось в экспериментальных исследованиях.



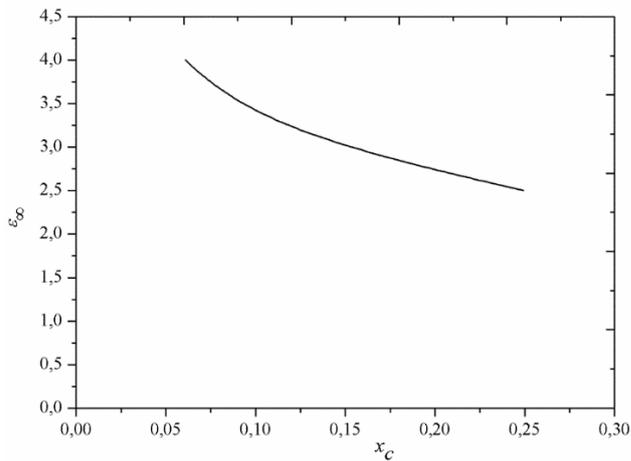
**Рис. 3. Изменение критической концентрации носителей  $x_c$  (для  $z=12$ ), соответствующей переходам металл /сверхпроводник-диэлектрик в LSCO и LBCO, в зависимости от  $\eta$  и  $\epsilon_\infty$**

В третьей главе «Новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы и их влияние на высокотемпературную сверхпроводимость в недолегированных и оптимально легированных купратах» исследуется бездефектное взаимодействие легированных дырок с акустическими и оптическими фоннными колебаниями в купратах с деформированной кристаллической решеткой. Рассматриваются также новые металл-сверхпроводник и сверхпроводник-диэлектрик переходы и их воздействие на высокотемпературную сверхпроводимость в данных материалах. Квазисвободные дырочные носители, введенные в полярные купратные материалы путем легирования, спонтанно автолокализуются при их сильных взаимодействиях с колебаниями решетки. Следовательно, эти легированные дырочные носители окружаются (или окутываются) локальными искажениями решетки и становятся большими поляронами с эффективными массами  $m_p \approx (2 - 3)m_e$  (где  $m_e$  — масса свободного электрона). Можно ожидать, что при повышении уровня легирования до определенного режима недолегирования легированный купратный материал может претерпевать фазовый переход из диэлектрического состояния в металлическое. Ниже  $T_c$  такой металл-диэлектрик переход происходит как переход сверхпроводник-диэлектрик.

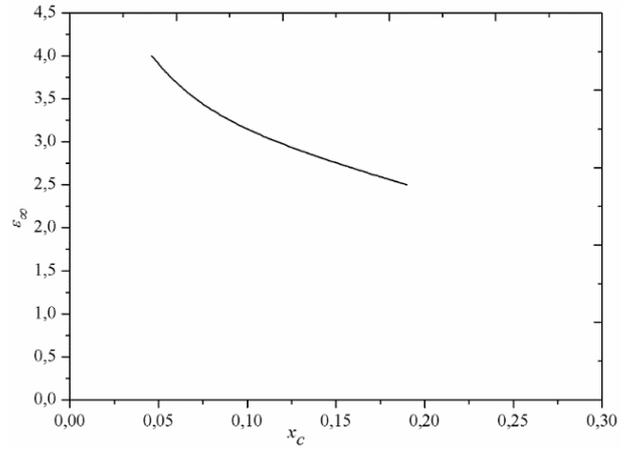
Новый критерий металл/сверхпроводник-диэлектрик перехода в легированных купратах можно записать как:

$$x \geq x_c = \frac{n_c}{n_a} = \frac{1}{3\pi^2 \hbar^3 n_a} [2m_p E_p]^{\frac{3}{2}}, \quad (13)$$

Теперь мы вычислим критические уровни легирования  $x_c$  для металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в высокотемпературных купратах на основе La и Y ( $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  и  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ). При этом мы берем расчетные значения  $E_p \approx (0.078 - 0.2)$ эВ при  $\epsilon_\infty = 2.5 - 4.0$  и  $\eta = 0.04$  и экспериментальные значения  $m_p \approx (2 - 3)m_e$ . Далее, изменения  $\epsilon_\infty$  с уменьшением  $x_c$  в LSCO и YBCO показаны на рисунках 4 и 5 для  $\eta = 0.04$ .



**Рис.4. Изменение  $x_c$  при уменьшении  $\epsilon_\infty$  в LSCO для  $\eta = 0.04$**



**Рис.5. Изменение  $x_c$  при уменьшении  $\epsilon_\infty$  в YBCO для  $\eta = 0.04$**

Представленные выше теоретические результаты для металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными по металл/сверхпроводник-диэлектрик переходам в недолегированных и оптимально легированных купратах. В частности, наши новые и наиболее важные результаты указывают на то, что в YBCO металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы и разделение фаз на конкурирующие металлические/сверхпроводящие-диэлектрические фазы происходят в диапазоне легирования  $0.05 \lesssim x_c \lesssim 0.19$  в соответствии с экспериментальными наблюдениями.

Диэлектрическая и металлическая/сверхпроводящая фазы конкурируют в недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратах, где несверхпроводящие (т.е. неподвижные) и сверхпроводящие дырочные носители ниже  $T_c$  находятся в обедненных (в диэлектрических) и богатых носителями (в сверхпроводящих) областях, соответственно. Можно предположить, что дырочные носители, находящиеся в достаточно расширенной поляронной зоне, могут стать подвижными, и их куперовское спаривание будет происходить в импульсном ( $k$ -) пространстве и приводить к образованию поляронных (т. е. сильно связанных) куперовских пар выше  $T_c$ , которые ведут себя как бозе-частицы и конденсируются в сверхтекучее состояние ниже  $T_c$ . На самом деле, такие предварительно сформированные куперовские пары будут существовать в легированных высокотемпературных купратах при  $\epsilon_F \sim \epsilon_A$  (где  $\epsilon_F$  – энергия Ферми и  $\epsilon_A$  – энергия притяжения между двумя поляронными носителями). Так как механизм парного взаимодействия между большими поляронами в диапазоне энергий  $\{-\epsilon_A, \epsilon_A\}$  намного сильнее, чем в обычной модели БКШ. В данном случае парный гамильтониан сильно взаимодействующего поляронного ферми-газа может быть диагонализирован с помощью Боголюбовского преобразования Ферми операторов. Затем можно использовать модельный потенциал межполяронного взаимодействия и получить следующее БКШ-

подобное щелевое уравнение для определения температуры  $T^*$  куперовского спаривания поляронов:

$$\frac{1}{\lambda_F} = \frac{1}{D(\varepsilon_F)\tilde{V}_F} = \int_0^{\varepsilon_A} d\xi \frac{\tanh \frac{\sqrt{\xi^2 + \Delta_F^2(T)}}{2k_B T}}{\sqrt{\xi^2 + \Delta_F^2(T)}}, \quad (14)$$

где  $\xi = \varepsilon(k) - \varepsilon_F$  - энергия больших поляронов, измеренная по их энергии Ферми  $\varepsilon_F$ ,  $\varepsilon(k)$  - кинетическая энергия этих поляронов,  $\lambda = D(\varepsilon_F)\tilde{V}_F$  - БКШ-подобная константа связи,  $D(\varepsilon_F)$  - плотность состояний на поверхности Ферми,  $\tilde{V}_F = V_A - V_C$ ,  $\tilde{V}_F = V_C/[1 + D(\varepsilon_F)V_C \ln(\varepsilon_C/\varepsilon_A)]$  - экранированное кулоновское взаимодействие между двумя фермионами,  $V_A$  и  $V_C$  - потенциал притяжения между фермионами и потенциал кулоновского взаимодействия, соответствующие энергиям обрезания  $\varepsilon_C$  и  $\varepsilon_A$ , соответственно,  $\Delta_F(T)$  - БКШ-подобная щель.

Когда  $\varepsilon_A \gg k_B T^*$ , уравнение. (14) дает

$$k_B T^* \approx 1.134 \varepsilon_A e^{-\frac{1}{\lambda_F}}, \quad (15)$$

Недолегированные и оптимально легированные ВТСП-купраты имеют низкие энергии Ферми  $\varepsilon_F \simeq (0.1 - 0.3)$  эВ. Для этих материалов можно принять  $\varepsilon_A = E_p + \hbar\omega_0$ , где  $\hbar\omega_0$  — энергия оптических фононов. Полагая  $\lambda_F \simeq 0.4$  и  $\varepsilon_A \simeq 0.15$  эВ (предполагая, что  $E_p \simeq 0.1$  эВ и  $\hbar\omega_0 \simeq 0.05$  эВ) для недолегированных купратов, находим, что  $T^* \simeq 162 K \gg T_c$  (возможные значения  $T_c$  для недолегированных купратов  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и  $Bi_2Si_2CaCu_2O_{8+\delta}$ , соответственно будут меньше 90 K и 100 K) в полном соответствии с экспериментальными результатами для  $T^*$  в таких высокотемпературных купратах. Если предварительно сформированные поляронные куперовские пары в недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратах ведут себя как бозоны, то их переход в сверхпроводящее состояние не описывается БКШ-подобной фермижидкостной теорией сверхпроводимости. В этих материалах теория БКШ становится непригодной для определения  $T_c$ . Только альтернативная теория (бозе-жидкостной) сверхпроводимости может быть адекватной для описания высокотемпературной сверхпроводимости в недолегированных и оптимально легированных купратах. Согласно такой теории, критическая температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  в ВТСП-купратах при  $\gamma_B \ll 1$  определяется из соотношения

$$T_c^{max} \simeq T_{BEC} \left[ 1 + c\gamma_B \sqrt{k_B T_{BEC} / \xi_B} \right] \quad (16)$$

где  $T_{BEC} = 3.31 \hbar^2 \rho_B^{2/3} / 2k_B m_B$  - температура бозе-эйнштейновской конденсации идеального бозе-газа поляронных куперовских пар,  $\rho_B$  - плотность притягивающих бозонов,  $m_B = 2m_p$  - масса бозонных куперовских пар,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $\xi_B$  - характерная толщина слоя

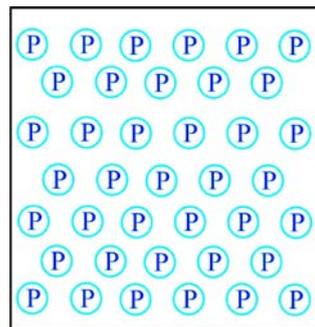
конденсации, включающая притягивающие бозонные куперовские пары,  $c = \pi^{3/2}/3.918$ ,  $\gamma_B \ll 1$ .

В предложенной нами микроскопической модели сверхпроводник-диэлектрик перехода и эволюции конкурирующих фаз, диэлектрические области в недолегированных купратах сужаются с повышением легирования, оставаясь лишь в виде небольших островков в оптимально легированных купратах, и исчезают при превышении этого уровня легирования. В этой более реалистичной картине только куперовские пары, находящиеся в металлических областях, конденсируются в бозе-сверхтекучей жидкости ниже  $T_c$  и участвуют в высокотемпературной сверхпроводимости, в то время как другие куперовские пары постепенно локализируются в областях обедненных носителями заряда из-за перехода из сверхпроводящей фазы в диэлектрическую фазу и, следовательно, становятся неподвижными и несверхпроводящими. В ВТСП-купратах критическая температура сверхпроводящего перехода, определяемая из выражения (16), достигает максимума  $T_c^{max}$  при некотором оптимальном легировании, близком к режиму сверхлегирования, когда при этом уровне легирования исчезают диэлектрические области. Однако при уровнях легирования  $x_c \lesssim 0.16$  критическая температура  $T_c$  становится меньше  $T_c^{max}$  и определяется из соотношения

$$T_c = \frac{V_S}{V_S + V_I} T_c^{max}, \quad (17)$$

где  $V = V_I + V_S$  суммарный (полный) объем диэлектрических и сверхпроводящих областей в купратах,  $V_I$  - объем диэлектрических областей в купратах,  $V_S$  - объем сверхпроводящих областей этих материалов.

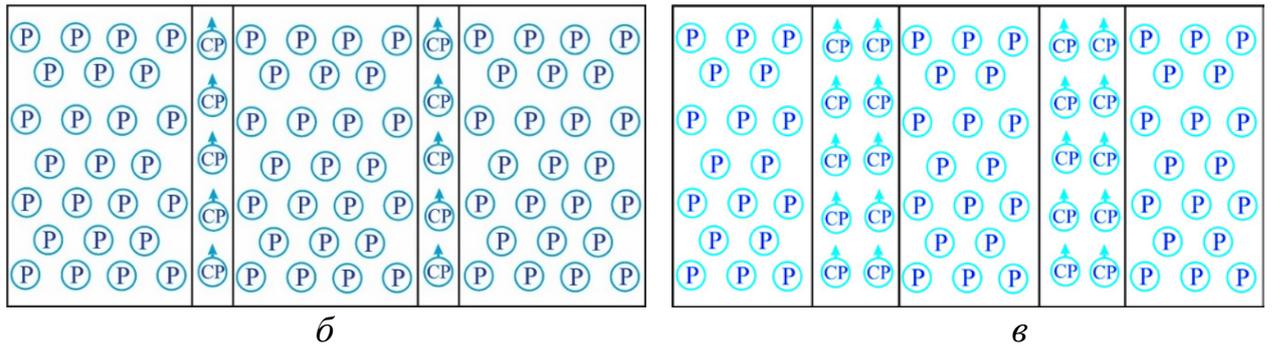
Если  $V_I = V$  и  $V_S = 0$ , то поляроны (P) в слаболегированных купратах ( $x_c \leq 0.02$ ) становятся неподвижными и несверхпроводящими (смотрите Рисунок 6а).



**Рис. 6а. Схематическая картина, показывающая существование неподвижных поляронных носителей во всем объеме слаболегированных купратов**

При  $V_I \gg V_S$  неподвижные поляроны (P) и подвижные (сверхпроводящие) куперовские пары (CP) в слаболегированных купратах ( $0.02 < x_c < 0.05$ ) существуют соответственно в широких диэлектрических

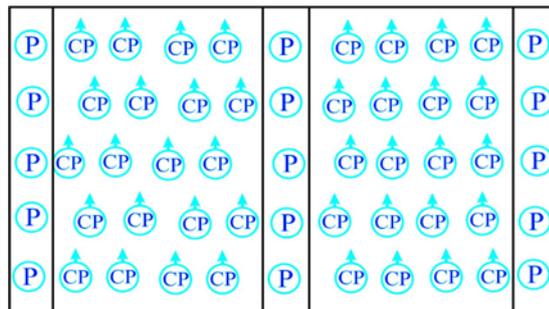
областях (полосах) и узких сверхпроводящих областях (полосах) (смотрите Рисунок 6б).



**Рис.6 (б, в). Схематическая картина, показывающая области существования неподвижных поляронов (без стрелок) и сверхпроводящих CP (со стрелками): б - в слаболегированных купратах ( $0.02 < x_c < 0.05$ ) при  $V_I \gg V_S$ ; в - в недолегированных купратах ( $0.05 < x_c < 1/8$ ) при  $V_I > V_S$**

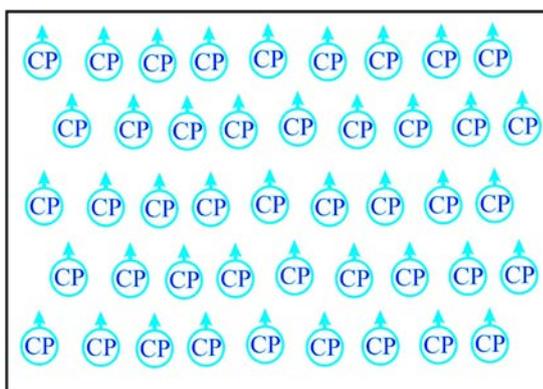
При  $V_I > V_S$  неподвижные поляроны (P) и подвижные (сверхпроводящие) CP в недолегированных купратах ( $0.05 < x_c < 1/8$ ) существуют соответственно в сравнительно узких диэлектрических областях (полосах) и сравнительно широких сверхпроводящих областях (полосах) (смотрите Рисунок 6в).

При  $V_I \ll V_S$  неподвижные поляроны (P) и подвижные (сверхпроводящие) CP в слегка недолегированных купратах ( $x_c > 1/8$ ) существуют соответственно в узких диэлектрических областях (полосах) и широких сверхпроводящих областях (полосах) (смотрите Рисунок 6г).



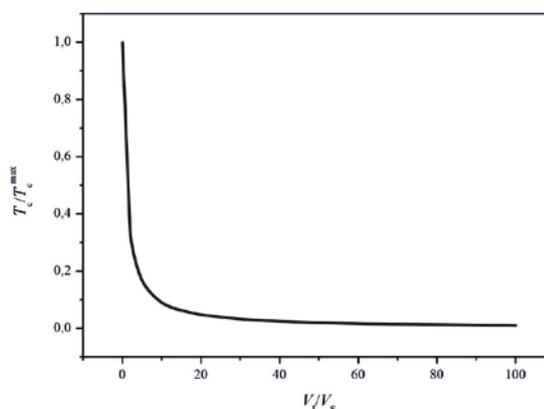
**Рис. 6г. Схематическая картина, показывающая области существования неподвижных поляронов (без стрелок) и сверхпроводящих CP (со стрелками) в слегка недолегированных купратах ( $x_c > 1/8$ ) при  $V_I \ll V_S$ .**

Если  $V_I = 0$  и  $V_S = V$ , то поляроны (P) связаны в бозонные куперовские пары, которые становятся сверхпроводящими CPами во всем объеме в оптимально легированных купратах ( $x_c \gtrsim 0.15$ ) (смотрите Рисунок 6д).



**Рис. 6д. Схематическая картина, показывающая существование сверхпроводящих CP (со стрелками) во всем объеме в оптимально легированных ВТСП-купратах ( $x_c \gtrsim 0.15$ )**

Изменение отношения  $T_c/T_c^{max}$  в ВТСП- купратах с диэлектрической объемной долей  $V_I/V_S$  показано на рисунке 7.



**Рис.7. Изменение  $T_c/T_c^{max}$  в высокотемпературных купратах с ростом  $V_I/V_S$**

Теперь, используя выражение (16), можем оценить значение  $T_c^{max}$  в оптимально легированном YBCO. Предполагая, что  $m_B = 4m_e$ ,  $\gamma_B = 0.25$ ,  $k_B T_{BEC} / \xi_B \approx 0.15$  и  $\rho_B \approx 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , находим  $T_{BEC} \approx 81 \text{ K}$  и  $T_c^{max} \approx 92 \text{ K}$  для оптимально легированного YBCO. Для недолегированной (UD) системы YBCO ( $x \lesssim 0.14$ ) можно принять  $f_I = V_I/V_S = 0.25$ . Тогда мы получаем  $T_c = T_c^{max} / 1.25 \approx 74 \text{ K}$ , что согласуется с экспериментальными данными для YBCO. В YBCO доля диэлектрического объема  $f_I$  достаточно мала при  $x > 0.15$  и  $T_c$  мало меняется между  $x_{UD} \approx 0.15$  и  $x_{OD} \approx 0.16$ . Это предсказанное поведение  $T_c$  также наблюдается экспериментально в YBCO. Если предположить, что отношение  $V_I/V_S$  в недолегированном LSCO имеет порядок 0.2 при  $x \lesssim 0.13$ , то мы получаем  $T_c \approx 0.83 T_c^{max} \approx 32 \text{ K}$ , что хорошо согласуется с экспериментальными результатами (например, при  $x=0.13$  значение  $T_c$  составляет около 32 К. В недолегированных и оптимально легированных купратах часть металлических/сверхпроводящих областей

переходит в диэлектрические состояния при уровне легирования  $x < 0.16$ . Поэтому в недолегированных купратах будет наблюдаться заметное подавление сверхпроводимости из-за более сильного поляронного эффекта и из-за увеличения доли диэлектрического объема за счет объема сверхпроводящих областей. Экспериментальные результаты тоже свидетельствуют о том, что поляронный эффект ослабевает с ростом легирования в сторону сверхлегированного режима. Это означает, что сверхпроводимость сильно усиливается в оптимально легированном режиме из-за ослабления поляронного эффекта и уменьшения массы  $m_p$  поляронов, входящих в выражение (16).

Сильное электрон (дырочно)-фононное взаимодействие в купратах также приводит к образованию волны зарядовой плотности, которая препятствует высокотемпературной сверхпроводимости в недолегированных купратах. Образование волны зарядовой плотности также сопровождается искажением решетки и похоже на образование поляронов. Кроме того, вызванные облучением беспорядки (т. е. дефекты решетки) в купратах могут сильно влиять на  $T_c$  и усиливать сверхпроводимость, поскольку усиленное вакансией аниона кулоновское отталкивание препятствует образованию поляронов. Фактически, экспериментально было обнаружено, что беспорядок, созданный в сверхпроводнике купрата  $La_{1.875}Ba_{0.125}CuO_4$  протонным облучением, увеличивает сверхпроводящую критическую температуру  $T_c$  на 50%, одновременно подавляя состояние волны зарядовой плотности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Металл-диэлектрик переходы и их влияние на высокотемпературную сверхпроводимость в дырочно легированных купратах на основе лантана и  $YBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ », сделаны следующие основные выводы:

1. Предложена двух носительная модель купратного сверхпроводника на основе лантана, в которой металл-диэлектрик переходы сначала происходят в сравнительно узком интервале легирования ( $0.07 < x \leq 0.14$ ) в беспримесных участках, а затем в широком интервале легирования ( $0.1 < x \leq 0.2$ ) в дефектных участках, содержащих примеси малых радиусов.

2. Выяснено, что новые металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы в лантановых купратах с одним носителем, обусловленные сильными взаимодействиями дырок с решеткой и поляронными эффектами, происходят в широком диапазоне легирования, когда значение  $\epsilon_\infty$  уменьшается от 5.0 до 2.5.

3. Впервые показано, что металл/сверхпроводник-диэлектрик переходы в зависимости от значений  $\epsilon_\infty$  и  $\eta$  (например, для  $\epsilon_\infty < 3$  и  $\eta \leq 0.02$ ) и типов

упорядочения поляронов (т.е.  $z=6, 8$  и  $12$ ) происходят в умеренно сверхлегированных ВТСП-материалах ( $x > 0.16$ ) в соответствии с экспериментальными данными из-за резкого увеличения энергии связи  $E_p$  больших поляронов от  $0.05$  эВ (при  $\epsilon_\infty = 5.0$ ) до  $0,2$  эВ (при  $\epsilon_\infty = 2.5$ ).

4. Продемонстрировано, что критическая температура в ВТСП-купратах возрастает от недолегированного до оптимально легированного режима из-за ослабления поляронного эффекта при увеличении уровня их легирования и исчезновения этого эффекта в оптимально легированных купратах, тогда как сильное электрон (дырочно)-фононное взаимодействие (поляронный эффект) в легированных ВТСП-купратах приводит к подавлению высокотемпературной сверхпроводимости из-за образования поляронов или так называемой волны зарядовой плотности, которая оказывает обратное воздействие на явление сверхпроводимости в недолегированных купратах.

5. Выявлено, что беспорядки или дефекты кристаллической решётки (в частности, анионные вакансии), возникающие при облучении в легированных ВТСП-купратах могут сильно повлиять на критическую температуру  $T_c$  сверхпроводящего перехода и усилить сверхпроводимость в них, так как анионные вакансии в купратах могут усилить кулоновское отталкивание дырочных носителей в них, препятствуя образованию поляронов и поляронных куперовских пар, как это экспериментально было обнаружено в ВТСП-купратах  $La_{1.875}Ba_{0.125}CuO_4$  при протонном облучении.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**Jumabaeva Gulmira Kairbaevna**

**METAL-INSULATOR TRANSITIONS AND THEIR INFLUENCE ON  
HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY IN HOLE-DOPED  
CUPRATES BASED ON LANTHANUM AND  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$**

**01.04.07 – Condensed matter physics**

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

**Tashkent – 2025**

**The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2024.2.PhD/FM1108.**

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

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

**Scientific consultant:** **Kurbanov Ulugbek**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Senior researcher

**Official opponents:** **Rakhimov Abdulla**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Senior researcher

**Yavidov Bahram**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dotsent

**Leading organization:** **Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025, at \_\_\_ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No. \_\_\_\_\_) Address: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025.  
(Registry record No. \_\_\_ dated “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025.)

**M.Yu. Tashmetov**  
Chairman of the Scientific Council on Award  
of Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

**O.R. Tojiboev**  
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award  
of Scientific Degrees, PhD Ph.-M.S.,  
Senior Researcher

**E.M. Tursunov**  
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council  
on ward of Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

## INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research** is to determine the mechanisms of localization of one and two types of current carriers and the possibility of realizing new metal/superconductor-insulator transitions in doped HTSC cuprates and their influence on the critical temperature  $T_c$  of the superconducting transition in them.

### **The tasks of the research:**

to establish possible mechanisms of metal/superconductor-insulator transitions in doped cuprates caused by strong electron-phonon and electron-impurity-phonon interactions, based on the two-carrier model of cuprate superconductors;

to define new criteria of metal/superconductor-insulator transitions in doped oxide HTSC materials and the possibilities of such transitions from underdoped to overdoped regimes in them;

to demonstrate the possibilities of separation and coexistence of metallic/superconducting and insulator phases in underdoped and optimally doped HTSC cuprates;

to determine the possible influences of metal/superconductor-insulator transitions on the critical temperature of the superconducting transition in underdoped and optimally doped oxide HTSC materials and the reasons for suppression and enhancement of superconductivity in them.

**The objects of the research** are underdoped, optimally doped and overdoped cuprates  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  (LBCCO),  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$  (LNSCO),  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  (LBCO),  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  (LSCO) and  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO).

**The subject of the research** is the processes of localization and delocalization of one and two types of charge carriers, new metal/superconductor-insulator transitions in underdoped, optimally doped and overdoped HTSC cuprates and their effect on  $T_c$ .

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

it is shown that within the framework of the two-carrier model of cuprate superconductors  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  and  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$ , metal-insulator transitions occur from an underdoped to an optimally doped regime in regions without impurities, and then in regions with small-radius impurities in optimally doped and overdoped regimes;

it has been established that in hole-doped cuprates  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  and  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  the realization of new metal/superconductor-insulator transitions due to strong hole-phonon interactions and polaron effects depends on the value of dielectric susceptibility  $\epsilon_\infty$  and the binding energy of the polarons, these transitions are observed in the range of underdoped to overdoped modes;

the influence of metal/superconductor-insulator transitions on the critical temperature of the superconducting transition in underdoped and optimally doped HTSC cuprates  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ ,  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  and  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  has been established, as well as the reasons for suppression and enhancement of superconducting in these materials;

it has been shown that in HTSC cuprates, the critical temperature of the superconducting transition  $T_c$  increases from underdoped to optimally doped regime with an increase in the contribution of the superconducting phase and a decrease in the contribution of the dielectric phase due to the weakening of the polaron effect in underdoped cuprates and its disappearance in the optimal doped cuprates.

**Implementation of research results.** Based on the obtained scientific results on the study of one and two types of charge carriers of metal/superconductor-insulator transitions and their influence on high-temperature superconductivity in hole-doped cuprates:

the results on the two-carrier model of cuprate superconductors  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$  and  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$ , as well as the influence of metal/superconductor-insulator transitions on the critical temperature of the superconducting transition and the established causes of suppression and enhancement of superconductivity in  $La_{2-x}Ba_{x-y}Ca_yCuO_4$ ,  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  and  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  materials are used in the educational process of the Kyzyl-Kiya Humanitarian and Pedagogical Institute within the framework of the program on the course “Quantum Physics” (letter of the Kyzyl-Kiya Humanitarian and Pedagogical Institute No. 395 dated 03.12.2024). The use of the results made it possible to expand students' understanding of modern problems of condensed matter physics and improve the quality of their education in the field of quantum physics;

the results on the implementation of new metal/superconductor-insulator transitions caused by strong hole-phonon interactions and polaron effects in hole-doped  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  and  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  cuprates were used in the framework of theoretical studies of high-temperature superconductors conducted at the N.N. Bogolyubov Laboratory of Theoretical Physics at JINR (letter of the N.N. Bogolyubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR No. 300-20/25 dated 13.12.2024). The use of the results made it possible to evaluate the consistency of theoretical models with experimental results, in particular, they made it possible to expand our understanding of the problems of modern condensed matter physics.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and the 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; I part)**

1. Джуманов С., Курбанов У.Т., Жумабаева Г.К. Переходы металл-диэлектрик в легированных лантановых сверхпроводниках с примесями малого радиуса // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент: АН РУз, 2022. - № 6. - С.25-31 (01.00.00. №7)
2. Kurbanov U.T., Zhumabaeva G.K., Dzhumanov S. Metal/superconductor-insulator transitions and their effects on high- $T_c$  superconductivity in underdoped and optimally doped cuprates // Доклады Академии наук РУз. - Ташкент: АН РУз, 2024. - №1. - С. 40 – 46 (01.00.00. №7)
3. Kurbanov U.T., Zhumabaeva G.K., Dzhumanov S. New metal/superconductor-insulator transitions and their effects on high- $T_c$  superconductivity in underdoped and optimally doped cuprates // Eurasian physical technical journal. - E.A.Buketov Karaganda State University Publish House (Kazakhstan), 2024. - V. 21. - No. 1(47). - P. 21-27 (№3. Scopus; IF=0,614)
4. Dzhumanov S., Kurbanov U.T., Zhumabaeva G.K. Distinctive features of metal/superconductor-insulator transitions in doped  $La$ -based cuprates with large-radius impurities // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. –Бишкек, 2024. - №8. - P.14-17 (№ 25. DOAJ; IF= 0,083).

**II bo'lim (Часть II; Part II)**

5. Dzhumanov S., Kurbanov U.T., Khudayberdiev Z.S., Rashidov J.Sh., Jumabaeva G.K. Metal-insulator transitions in crystalline and non-crystalline solids // “Modern Problems of Nuclear Energetics and Nuclear Technologies”: Book of abstracts of the International Conference, November 23-25, 2021. – Tashkent: Institute of Nuclear Physics, 2021. - p.114
6. Kurbanov U.T., Khudayberdiev Z.S., Jumabaeva G.K., Julliev A.N. Metal-insulator transitions in doped  $La$ -based superconductors with small-radius dopants // IV International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2022. – p. 90-91.
7. Dzhumanov S., Kurbanov U.T., Jumabaeva G.K., Rashidov J.Sh. Metal-insulator transitions, nanoscale phase separations and related high- $T_c$  superconductivity in  $Bi$ -based cuprate compounds // IV International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” September 26-30, 2022. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2022. – p. 89-90.
8. Kurbanov U.T., Jumabaeva G.K. Metal-insulator transitions in doped  $La$ -based superconductors with small-radius dopants // Ёш олимлар ва физик

- талабаларнинг III Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА- III) 2023 йил 15 июнь. – Тошкент, 2023. - 280-281б.
9. Kurbanov U.T., Jumabaeva G.K. Metal/superconductor-insulator transitions and their effects on high- $T_c$  superconductivity in underdoped and optimally doped cuprates // Тезисы докладов XX Международной научной конференции молодых ученых, 20–22 сентября 2023. - Минск, Белоруссия, 2023. - С. 498-501.
  10. Kurbanov U.T., Jumabaeva G.K., Dzhumanov S., Rashidov J.Sh. Metal/superconductor-insulator transitions and related effects on high- $T_c$  superconductivity in hole-doped cuprates // Труды Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», 19-21 октября 2023. – Ташкент: ФТИ АН РУз, 2023. - С. 188-189.
  11. Kurbanov U.T., Jumabaeva G.K. Distinctive features of metal-insulator transitions, multiscale phase separation in hole-doped cuprates // Материалы Международной научно-практической конференции «Физика и Экология», 15-16 сентября 2023. – Нукус: Нукусский государственный педагогический институт, 2023. - С. 91-93.
  12. Dzhumanov S., Kurbanov U.T., Zhumabaeva G.K. Distinctive features of metal/superconductor-insulator transitions in doped *La*-based cuprates with large-radius impurities // V International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” October 7-11, 2024. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2024. –p.120.
  13. Kurbanov U.T., Zhumabaeva G. K., Dzhumanov S., Rashidov J.Sh. Metal/superconductor-insulator transitions and their influence on high- $T_c$  superconductivity in underdoped and optimally doped cuprates // V International scientific forum “Nuclear Science and Technologies” October 7-11, 2024. Abstracts. – Almaty (Republic of Kazakhstan), 2024. –p.131.
  14. Курбанов У.Т., Жумабаева Г.К. Отличительные особенности металл/сверхпроводник-диэлектрик переходов в легированных купратах на основе *La* с примесями большого радиуса // Сборник тезисов I Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и перспективы развития физики», 22-23 октября 2024. – Наманган: Наманганский государственный университет, 2024. - С.263-264.