BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

TO‘RAYEV OZODJON G‘AYRAT O‘G‘LI

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123), $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212) KUPRATLARINING KRISTALL TUZILISHI VA O‘TA O‘TKAZUVCHANLIGI

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Buxoro – 2026

UO‘K 538.945.7

Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам
Contents of the dissertation abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

To‘rayev Ozodjon G‘ayrat o‘g‘li
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123), $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212) kupratlarining kristall tuzilishi va o‘ta o‘tkazuvchanligi.....3

Тураев Озоджон Гайрат угли
Кристаллическая структура и сверхпроводимость купратов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) и $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212) 27

Turayev Ozodjon Gayrat ogli
Crystal structure and superconductivity of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) and $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212) cuprates.....53

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati
Список опубликованных работ
List of published works.....59

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI

TO‘RAYEV OZODJON G‘AYRAT O‘G‘LI

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123), $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212) KUPRATLARINING KRISTALL TUZILISHI VA O‘TA O‘TKAZUVCHANLIGI

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

AVTOREFERATI

Buxoro – 2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2025.1.PhD/FM1249 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Buxoro davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash web-sahifasi (www.buxdu.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	**Turayev Akmal Atayevich** fizika-matematika fanlari falsafa doktori (PhD), professor
Rasmiy opponentlar:	**Astanov Salix Husenovich** fizika-matematika fanlari doktori, professor
	Kurbanov Ulug'bek Tajibayevich fizika-matematika fanlari doktori (DSc), katta ilmiy xodim
Yetakchi tashkilot:	**Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Buxoro davlat universiteti huzuridagi PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil 17-oktabr soat 10 00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 200117, Buxoro shahar, M. Iqbol ko'chasi 11-uy. Tel. (+99865) 221-30-46; faks (+99865) 221-29-06; e-mail: buxdu_rektor@buxdu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (D/1034 raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 200117, Buxoro shahar, M. Iqbol ko'chasi 11-uy. Tel. (+99865) 221-30-46).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil "5" oktabr kuni tarqatildi.

(2026-yil "5" oktabr dagi 2 raqamli reystr bayonnomasi)

M.Z. Sharipov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

Sh.Sh. Fayziyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash kotibi, fizika-matematika fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent

Sh.A. Raximov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda elektr energiyasiga bo‘lgan talabning izchil ortib borishi, energiya resurslaridan oqilona foydalanish zarurati, uzatish va taqsimlash tarmoqlaridagi texnik yo‘qotishlarni kamaytirish hamda yuqori samaradorlikka ega energetik qurilmalarni yaratish zamonaviy materialshunoslik va kondensirlangan holat fizikasi oldiga muhim ilmiy-texnik vazifalarni qo‘ymoqda. Ayniqsa, elektr tokini qarshiliksiz o‘tkazish, kuchli magnit maydonlarda barqaror ishlash va yuqori tok zichligini ta’minlash xususiyatlariga ega o‘ta o‘tkazuvchi materiallar energetika, tibbiy diagnostika, yuqori aniqlikdagi o‘lchov texnikasi, kvant texnologiyalari, magnit levitatsiya tizimlari hamda termoyadroviy energetika kabi strategik sohalarda alohida ahamiyat kasb etmoqda. Yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchi materiallar asosida elektr energiyasini uzatish kabellari, o‘ta o‘tkazuvchi magnitlar, tok cheklagichlar, magnit energiya saqlash tizimlari va zamonaviy elektron qurilmalarni ishlab chiqish bo‘yicha ilmiy izlanishlar jadal rivojlanmoqda. O‘ta o‘tkazuvchi simlar bozorining 2025-yilda 1,32 mlrd AQSH dollariga baholanishi va 2030-yilga borib 2,19 mlrd AQSH dollariga yetishi prognoz qilinayotgani ushbu yo‘nalishning nafaqat fundamental fan, balki yuqori texnologiyali sanoat va innovatsion energetika uchun ham muhim amaliy ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatadi[1].

Jahonda yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan (YuHO‘O‘) materiallar, xususan, ittriy-bariy-mis oksidi ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) va vismut-stronsiy-kalsiy-mis oksidi ($Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+\delta}$) kupratlari zamonaviy materialshunoslik va kondensirlangan holat fizikasining dolzarb tadqiqot obyektlari hisoblanadi. Y123 va Bi2212 kupratlarida o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalarining kristall tuzilish, kislorod tanqisligi va legirlash darajasi bilan murakkab korrelyatsion bog‘liqlikka ega ekanligi ularning fizik mexanizmlarini chuqur fundamental tadqiq etishni taqozo etadi. Mazkur materiallarda kritik harorat T_c, kritik tok zichligi, elektr qarshilikning o‘zgarish qonuniyatlari va o‘ta o‘tkazuvchan fazaning barqarorligi kislorod miqdori, fazaviy tarkib, kristall panjara parametrlari hamda termik ishlov berish sharoitlariga bevosita bog‘liq. Shu sababli Y123 va Bi2212 kupratlarini olish texnologiyasini optimallashtirish, ularning strukturaviy holatini boshqarish hamda kritik harorat va o‘ta o‘tkazuvchanlik parametrlarini yaxshilashga qaratilgan tadqiqotlar yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchanlik hodisasining fizik mexanizmlarini aniqlash va nazariy jihatdan asoslash, amaliy qo‘llash imkoniyatlarini kengaytirish hamda istiqbolli funksional materiallar yaratish nuqtayi nazaridan muhim ilmiy-amaliy vazifalardan biri hisoblanadi.

Respublikamizda energiya resurslaridan oqilona foydalanish, yuqori texnologiyali ishlab chiqarish tarmoqlarini rivojlantirish hamda elektrofizik xossalari boshqariladigan yangi funksional materiallar yaratishga yo‘naltirilgan ilmiy izlanishlar alohida ahamiyat kasb etmoqda. Jumladan, “O‘zbekiston – 2030” strategiyasida “... iqtisodiyot tarmoqlarining energiya samaradorligini oshirish, “yashil energiya” texnologiyalarini keng joriy etish va resurslardan oqilona foydalanish”[2] bo‘yicha muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga

[1] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/superconducting-wire-market-226116096.html
[2] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 11-sentabrdagi PF-158-sonli “«O‘zbekiston – 2030» strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni.

oshirishda yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchi kuprat materiallar, xususan Y123 va Bi2212 kupratlarining kristall tuzilishi, fazaviy tarkibi, kislorod stexiometriyasi, kristall panjara parametrlari hamda o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalarini chuqur tadqiq etish muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi. Shu sababli Y123 va Bi2212 kupratlarining kristall tuzilish parametrlarini boshqarish hamda kritik harorat va o‘ta o‘tkazuvchanlik ko‘rsatkichlarini yaxshilashga qaratilgan tadqiqotlar energiya yo‘qotishlarini kamaytiruvchi istiqbolli funksional materiallar yaratish, elektrotexnika, kriogen elektronika, magnit tizimlar va yuqori samarali energetik qurilmalar uchun ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.

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, 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-sonli “Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarori, 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi Farmoni, 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-sonli “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarori hamda mazkur sohadagi boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan ilm-fan, energiya samaradorligi, zamonaviy materialshunoslik va yuqori texnologik tadqiqotlarni rivojlantirishga doir vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining II – “Energetika, energotejamkorlik va muqobil energiya manbalari” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Zamonaviy materialshunoslik, qattiq jism fizikasi va o‘ta o‘tkazuvchanlik fizikasi rivojining hozirgi bosqichida Y123 hamda Bi2212 tarkibli kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlar eng istiqbolli va fundamental ahamiyatga ega murakkab oksid materiallar qatorida qaralmoqda. Ushbu materiallarning sintez texnologiyasini takomillashtirish, kislorod stexiometriyasi va kationlar nisbatini boshqarish, kristall panjaradagi nuqsonlar, donalararo chegaralar, fazaviy geterogenlik hamda teksturalanish jarayonlarining o‘ta o‘tkazuvchanlik parametrlariga ta’sirini aniqlash bo‘yicha dunyoning yetakchi ilmiy markazlarida keng ko‘lamli nazariy va eksperimental tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada T. Horide (Yaponiya), C.T. Lin (Germaniya), M. Nagao (Yaponiya), D.C. Larbalestier (AQSH), J.L. MacManus-Driscoll (Buyuk Britaniya), J. Jiang (AQSH), E.E. Hellstrom (AQSH), G.D. Gu (AQSH), H. Eisaki (Yaponiya) va boshqa yetakchi olimlar tomonidan olingan ilmiy natijalar kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlarning fazaviy shakllanish qonuniyatlarini, kristall-kimyoviy xususiyatlarini, tok tashish mexanizmlarini hamda amaliy qo‘llanish imkoniyatlarini chuqurroq tushunishga muhim hissa qo‘shmoqda.

YuHO‘O‘larning fundamental fizik xossalarini o‘rganish va ularning amaliy qo‘llanish imkoniyatlarini kengaytirish borasida mamlakatimiz olimlari tomonidan ham izchil ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Xususan, D.R. Djurayev, S.

Djumanov, B.Y. Yavidov, E.M. Ibragimova hamda D. Gulamova tomonidan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchanlik hodisasining nazariy va eksperimental jihatlari, kupratlarda strukturaviy o‘zgarishlar, zaryad tashuvchilar dinamikasi, magnit hamda transport xossalarini tadqiq etishga doir salmoqli ilmiy natijalarga erishilgan.

Yuqorida qayd etilgan olimlarning ilmiy ishlari Y123 va Bi2212 kupratli o‘ta o‘tkazgichlarning sintezi, kristall tuzilishi hamda elektrofizik xossalarini tadqiq etishda muhim nazariy va amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi. Ushbu tadqiqotlarda olingan ilmiy natijalarning tahlili Y123 va Bi2212 namunalarini olish jarayonida sintez harorati, termik ishlov berish rejimi, kislorod miqdori, fazaviy tarkib va kristall panjara parametrlarining kritik harorat T_c ga ta’sirini aniqlash, shuningdek, ularning transport, magnit va o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalari o‘rtasidagi korrelyatsion bog‘lanishlarni o‘rganish zarurligini ko‘rsatadi. Biroq mazkur kupratlarda texnologik parametrlar, strukturaviy omillar va o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalari orasidagi o‘zaro bog‘liqliklar hozirga qadar yetarli darajada o‘rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Buxoro davlat universitetining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi Farmoni ijrosini ta’minlash doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ va $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ yuqori haroratli kuprat o‘ta o‘tkazgichlarini olish texnologiyasi parametrlarining kristall tuzilishi va o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalariga (kritik haroratiga) ta’sirini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari quyidagilardan iborat:

tajribalar asosida Y123 va Bi2212 kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlarni sintez qilish jarayonida faza hosil bo‘lishi, kristall tuzilmaning shakllanishi va kislorod stexiometriyasining barqarorlashuviga ta’sir etuvchi harorat hamda vaqt rejimlarini aniqlash;

Y123 tarkibli kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgich namunalarini sintez qilishda ko‘p bosqichli sovitish texnologiyasining o‘ta o‘tkazuvchan faza shakllanishidagi rolini aniqlash, sovitish jarayonining har bir termik bosqichida kislorod atomlarining kristall panjara bo‘ylab diffuziyalanishi, Cu–O zanjirlarida tartiblanishi, kislorod vakansiyalarining qayta taqsimlanishi hamda tetragonal fazadan ortorombik fazaga o‘tish jarayonlariga ta’sirini tadqiq etish;

olingan namunalarning kristall tuzilishini rentgen difraksion tahlil asosida tadqiq etish, difraksion maksimumlarning intensivligi, siljishi va kengayishi orqali fazaviy tarkib, kristall panjara simmetriyasi (ortorombik yoki tetragonal strukturaviy holat) hamda strukturaviy nuqsonlar mavjudligini aniqlash;

sintez va termik ishlov berish parametrlarining kritik harorat T_c hamda o‘ta o‘tkazuvchanlik holatining shakllanishiga ta’sirini eksperimental aniqlash, shuningdek, T_c ning texnologik va strukturaviy omillarga bog‘liqligini ifodalovchi regressiya asosidagi empirik formulani ishlab chiqish;

Taguchi tajribalarni rejalashtirish usuli va regressiya tahlili asosida Y123 tarkibli kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlar sintezini belgilovchi asosiy

texnologik omillar – kalsinatsiya va sinterlash haroratlari, izotermik ushlab turish vaqtlari, presslash bosimi hamda sinterlashdan keyingi sovitish vaqtining T_c qiymatiga ko‘rsatadigan nisbiy ta’sir ulushini eksperimental aniqlash;

tajriba asosida olingan kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgich namunalarida Meyssner effektining namoyon bo‘lishini eksperimental kuzatish orqali materialda haqiqiy o‘ta o‘tkazuvchan faza shakllanganligini tasdiqlash.

Tadqiqotning obyekti. Tadqiqot obyekti sifatida $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ va $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ kupratlari olingan.

Tadqiqotning predmeti. Qattiq fazali sintez usuli bilan olingan Y123 va Bi2212 kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlarning kristall tuzilishi, panjara parametrlarining kislorod miqdoriga bog‘liq o‘zgarishi, CuO_2 tekisliklari va Cu–O zanjirlaridagi strukturaviy tartiblanish, Raman spektrlari va rentgen difraksion tahlil natijalari, shuningdek, elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi asosida o‘ta o‘tkazuvchan holatga o‘tish jarayoni, kritik harorat va elektrofizik xossalarning shakllanish qonuniyatlaridan iborat.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqotda kupratlarni sintez qilish uchun qattiq fazali reaksiya usulidan, namunalar xossalarini o‘rganish uchun rentgen difraksiyasi (Rietveld tahlili bilan), Raman spektroskopiyasi, elektr qarshilikni o‘lchashning to‘rt kontaktli usuli va magnit levitatsiya tajribasidan, tajriba natijalarini tahlil qilish uchun esa Taguchi tajribalarni rejalashtirish usuli hamda regressiya tahlilidan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

qattiq fazali sintez jarayonining asosiy texnologik parametrlari – kalsinatsiya va sinterlash rejimlari, kislorod muhiti hamda sovitish tezligini maqsadli o‘zgartirish natijasida adabiyotlarda qayd etilgan 91–93 K qiymatlardan yuqori, T_c = 95,5 K kritik haroratga va ΔT = 3 K o‘tish kengligiga ega $YBa_2Cu_3O_{6,91}$ tarkibli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan namuna olingan;

Y123 kupratini sintez qilishning texnologik parametrlari bilan kritik harorat T_c o‘rtasidagi miqdoriy bog‘lanish regressiya tahlili asosida aniqlanib, T_c qiymatini yuqori ishonchlilik bilan bashorat qilish imkonini beruvchi, determinatsiya koeffitsiyenti R^2 = 0,91 bo‘lgan empirik regressiya modeli ishlab chiqilgan;

Y123 kupratini sintez qilish jarayonida kalsinatsiya va sinterlash haroratlari, izotermik ushlab turish vaqtlari, presslash bosimi va sinterlashdan keyingi sovitish vaqti kabi asosiy texnologik omillarning kritik harorat T_c ga ta’siri Taguchi tajribalarni rejalashtirish usuli asosida kompleks faktorli tahlil qilinib, parametrlarning T_c ni shakllantirishdagi nisbiy ta’sir darajasi $T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P$ ketma-ketligida ekanligi eksperimental aniqlangan;

kislorod stexiometriyasi optimal bo‘lgan Y123 namunalarida apikal Cu2–O4 bog‘ uzunligi (2,297 Å) va CuO_2 tekisliklaridagi Cu–O–Cu bog‘ burchaklari (≈164–165°) tajribaviy aniqlanib, ushbu lokal strukturaviy parametrlarning o‘ta o‘tkazuvchan holatga o‘tish kritik harorati T_c bilan o‘zaro bog‘liqligi umumlashtirilgan va ularning T_c shakllanishidagi roli ilmiy jihatdan asoslangan;

Bi2212 namunasi elektr qarshiligining haroratga bog‘liqligini tadqiq etish natijasida 80, 102 va 120 K haroratlarda kechuvchi ko‘p bosqichli o‘ta o‘tkazuvchan–normal holat o‘tishlari, shuningdek, 284 K atrofida kuzatiladigan qo‘shimcha fazaviy anomaliya aniqlanib, namunaning murakkab (ko‘p fazali)

tarkibga ega ekanligi asoslab berilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ittriy asosli Y123 kupratlarini qattiq fazali reaksiya usulida sintez qilish uchun harorat-vaqt rejimlari, kislorod muhiti va sovitish sharoitlari optimallashtirilib, yuqori fazaviy tozalik va barqaror o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalariga ega namunalar olish texnologiyasi ishlab chiqilgan;

Bi2212 namunasida aniqlangan 80, 102 va 120 K haroratlardagi o‘tishlar hamda 284 K atrofidagi anomaliya asosida materialning fazaviy tarkibi va o‘ta o‘tkazuvchanlik sifatini elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi orqali nazorat qilish mezonlari taklif etilgan hamda yuqori kritik haroratli namunalar olish uchun sintez va termik ishlov berish rejimlari ishlab chiqilgan;

Y123 namunasi uchun kristall panjara shakllanishiga ta’sir qiluvchi sintez parametrlarining kritik harorat T_c ga ta’sir ulushini ifodalovchi hamda kritik haroratni yuqori aniqlikda bashorat qiluvchi regressiya asosidagi empirik formula ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi kondensirlangan holat fizikasi va materialshunoslikning sinovdan o‘tgan zamonaviy tajribaviy usullaridan foydalanilgani, jumladan, Y123 va Bi2212 namunalarining fazaviy tarkibi va kristall tuzilishi rentgen difraksion tahlil asosida aniqlangani, apikal Cu–O bog‘ uzunligi hamda Cu–O–Cu bog‘ burchaklari strukturaviy tahlil qilingani, kritik harorat elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi orqali baholangani, shuningdek, kislorod miqdori, strukturaviy parametrlar va o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalari orasidagi bog‘lanishlarning o‘zaro muvofiqligi hamda hisobiy va tajribaviy natijalarning bir-biriga mos kelishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati Y123 kupratida yuqori kritik haroratga erishish sintez jarayonining texnologik parametrlari, kislorod miqdori hamda kristall tuzilish xususiyatlariga bevosita bog‘liq ekanligi tajribada asoslab berilgani bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati Y123 va Bi2212 yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan namunalarini olishning optimal texnologik parametrlari ilmiy jihatdan asoslab berilgani bilan belgilanadi; bu natijalar mazkur materiallarni talab etilgan strukturaviy va elektrofizik xossalarga ega holda keng miqyosda ishlab chiqarish hamda ularni energetika, elektrotexnika va kriogen qurilmalarda qo‘llash uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Y123 va Bi2212 yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan namunalarining kristall tuzilishi va o‘ta o‘tkazuvchanligi bo‘yicha olingan natijalar asosida:

Y123 namunalarining magnit xossalari va ularda kuzatiladigan Meyssner effekti bo‘yicha olingan natijalardan Rossiya Fanlar akademiyasi Sibir bo‘limi L.V. Kirenskiy nomidagi Fizika institutida 2021–2030-yillarda bajarilayotgan № FWES-2024-0001 “Yangi funksional magnit materiallar va gibrid tuzilmalarni izlash, sintez qilish hamda tadqiq etish” mavzusidagi ilmiy loyihada foydalanilgan (Rossiya Fanlar akademiyasi Sibir bo‘limi Fizika institutining 2026-yil 31-martdagi 03-125-son ma’lumotnomasi). Olingan ilmiy natijalardan foydalanish istiqbolli magnit xossalarga ega yangi materiallarni aniqlash, ularning strukturaviy va funksional parametrlarini maqsadli boshqarish hamda yuqori magnit

ko‘rsatkichlarga ega materiallarni sintez qilish imkonini bergan;

Y123 namunasi uchun kristall panjara shakllanishiga ta’sir qiluvchi sintez parametrlarining kritik harorat T_c ga ta’sir ulushini ifodalovchi hamda kritik haroratni yuqori aniqlikda bashorat qiluvchi regressiya asosidagi empirik formuladan Andijon mashinasozlik instituti (hozirgi Andijon davlat texnika instituti) va Xitoy Xalq Respublikasining Shimoliy Xitoy texnologiya universiteti hamkorligida 2022–2023-yillarda bajarilgan № MUK-2021-40 “Katta ma’lumotlarga asoslangan intellektual (AI) qayta tiklanuvchi energiya tarmog‘i tizimini tadqiq qilish va qo‘llash” mavzusidagi qo‘shma fundamental ilmiy tadqiqot loyihasining ilmiy natijalarini olishda foydalanilgan (Andijon davlat texnika institutining 2026-yil 29-yanvardagi 01-03-404-son ma’lumotnomasi). Mazkur ilmiy natijalardan foydalanish energiyani saqlash tizimlarini loyihalash usuli asosida butun tizimning ishonchliligi va ish samaradorligini optimal taqsimlash mexanizmini ishlab chiqish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 4 ta xalqaro va respublika miqyosidagi anjumanlarda muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha 20 ta ilmiy ish chop etilgan. Shulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda 9 ta maqola, shu jumladan, 1 tasi Scopus bazasidagi xorijiy jurnalda nashr etilgan.

Dissertatsiya ishining tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, to‘rt bob, xulosa, e’lon qilingan ishlar ro‘yxati, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovadan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 128 betdan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

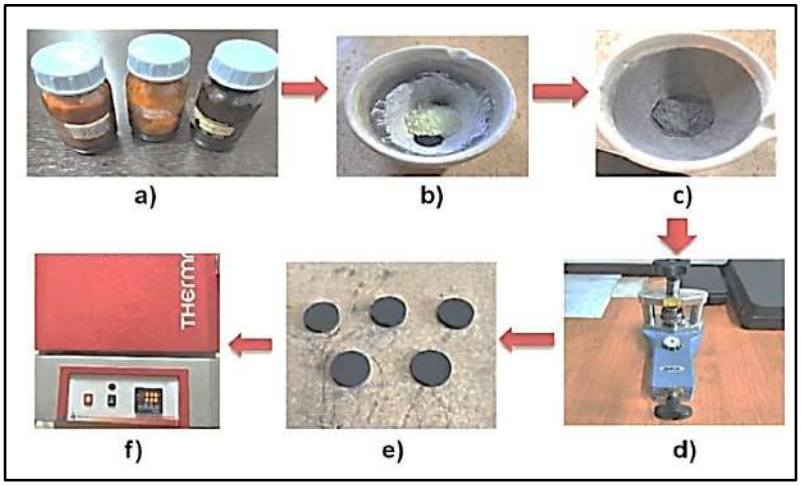
Dissertatsiyaning kirish qismida olib borilgan ilmiy tadqiqotning dolzarbligi va uni amalga oshirish zarurati ilmiy-nazariy va amaliy jihatdan asoslab berilgan. Muammoning hozirgi kunga qadar o‘rganilganlik darajasi tahlil qilinib, tadqiqotning maqsadi va undan kelib chiqadigan vazifalar aniq belgilangan. Tadqiqot mavzusining O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga muvofiqligi ko‘rsatilib, bajarilgan ish doirasida olingan ilmiy yangiliklar va ularning amaliy ahamiyati bayon qilingan.

Dissertatsiyaning **“Yuqori haroratli kuprat o‘ta o‘tkazgichlarning nazariy asoslari”** deb nomlangan birinchi bobida metallar va legirlangan mis-oksidli (kupratli) birikmalarda o‘ta o‘tkazuvchanlikning nazariy asoslari hamda yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchanlikni tavsiflovchi asosiy mexanizmlar bo‘yicha adabiyotlar tahlili keltirilgan. An’anaviy past haroratli metall o‘ta o‘tkazgichlar uchun ishlab chiqilgan Bardin–Kuper–Shriffer (BKSh) nazariyasining qo‘llanish doirasi va uning chegaralari tahlil qilinib, kupratlarda kuzatiladigan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchanlikni ushbu yondashuv bilan to‘liq tushuntirib bo‘lmasligi ko‘rsatib berilgan. Yuqori haroratli kuprat o‘ta o‘tkazgichlarning o‘ziga xos xususiyatlari – qatlamli kristall tuzilma, CuO_2 tekisliklarining hal qiluvchi roli, kuchli elektron korrelyatsiyalar, *d*-simmetriyali Kuper juftliklari

hamda g‘ayrioddiy metall fazalar nazariy modellar doirasida tahlil qilingan. Bobda keltirilgan nazariy tahlillardan kelib chiqib tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilab olingan.

Dissertatsiya ishining **“Namuna olish texnologiyalari va tadqiqot usullari”** deb nomlangan ikkinchi bobida tadqiqot obyekti bo‘lgan kupratlarning olinish texnologiyalari, namunalarni sifat jihatdan tekshirish va o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalarini aniqlash bo‘yicha tadqiqot usullari tizimli o‘rganib chiqilgan.

Kupratlarni olishning qattiq fazali reaksiya usuli tegishli metall oksidlari yoki karbonatlarini maydalab aralashtirish hamda kationlarning o‘zaro diffuziyasini ta’minlash uchun aralashmani yuqori haroratda kalsinatsiya qilishdan iborat. Tadqiqotda namunalar 1-rasmda keltirilgan bosqichlar bo‘yicha olingan.



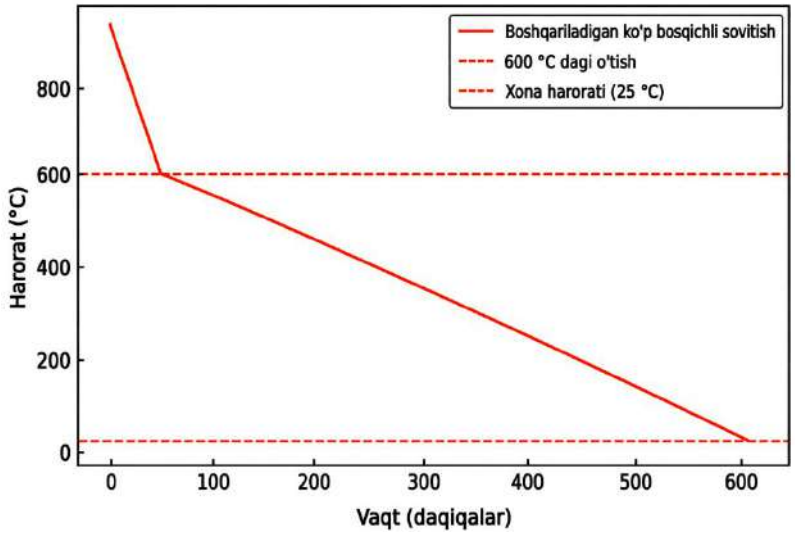
1-rasm. Qattiq fazali reaksiya usulining bosqichlari: a) boshlang‘ich xomashyo (oksid va karbonatlar); b) yuqori aniqlikda tortish va aralashtirish; c) dastlabki termik ishlov (kalsinatsiya); d) presslash jarayoni; e) presslangan tabletkalar; f) yakuniy termik ishlov (sinterlash).

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) kuprat keramik namunalari qattiq fazali reaksiya usuli orqali sintez qilindi. Boshlang‘ich reagentlar sifatida kamida 99,99 % tozalikka ega Y_2O_3, $BaCO_3$ va CuO kukunlari tanlanib, ular ittriy oksidi massasiga nisbatan Y_2O_3:$BaCO_3$:CuO = 1:3,5:2,1 massaviy nisbatda aralashtirildi. Komponentlarning bir jinsli taqsimlanishini ta’minlash maqsadida kukun aralashmasi agat hovonchada puxta maydalandi. Tayyorlangan aralashma dastlab havoda 880 °C haroratda 12 soat davomida kalsinatsiya qilindi.

Kalsinatsiyadan so‘ng namuna xona haroratigacha sovitilib, qayta maydalandi va 150 kgf/sm^2 (≈14,7 MPa) bosim ostida diametri 15 mm bo‘lgan silindrsimon tabletkalar shaklida presslandi. Presslangan namunalarning yakuniy sinterlanishi havoda 900 °C haroratda 12 soat davomida amalga oshirildi. Mazkur termik ishlov Y123 fazasining kristallanishi, donalararo bog‘lanishning yaxshilanishi va keramik namunalarning zichlashishini ta’minlashga xizmat qildi.

Sinterlashdan so‘ng $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ fazasida kislorod tartiblanishini yaxshilash va o‘ta o‘tkazuvchan ortorombik strukturani barqarorlashtirish maqsadida boshqariladigan ko‘p bosqichli (ikki bosqichli) sovitish rejimi qo‘llanildi. Dastlab namunalar 940 °C dan 600 °C gacha 7–8 °C/min tezlikda sovitildi. Ushbu bosqich yuqori harorat sohasida kislorodning panjara bo‘ylab qayta taqsimlanishi,

ikkilamchi fazalar hosil bo‘lishining cheklanishi hamda Y123 fazasining saqlanishi uchun muhim omil hisoblanadi. Keyingi bosqichda sovitish tezligi 1 °C/min gacha kamaytirilib, jarayon kislorod oqimi muhitida olib borildi. Sekin sovitish Cu–O zanjirlarida kislorod atomlarining tartibli joylashuvini, δ qiymatining kamayishini va o‘ta o‘tkazuvchanlik uchun zarur bo‘lgan ortorombik kristall simmetriyaning shakllanishini ta’minladi (2-rasm).



2-rasm. Y123 namunasini olishda optimal kislorod miqdorini ta’minlash uchun ko‘p bosqichli sovitishning harorat-vaqt rejimi.

Namunalardagi yakuniy kislorod miqdorini massa o‘zgarishi orqali aniqlash mumkin. Bunda massaning barcha yo‘qotilishi faqat kislorod miqdorining boshlang‘ich stexiometrik qiymati 7,00 dan kamayishi bilan bog‘liq deb faraz qilinadi. Namunadagi moddaning dastlabki miqdori (mollar soni) N_i kislorod tanqisligi yuzaga kelgandan keyingi mollar soni N_f ga teng bo‘ladi:

$$N_i = N_f \equiv N \tag{1}$$

$YBa_2Cu_3O_7$ ning molyar massasi M(Y123) quyidagicha aniqlanadi:

$$M(\text{Y123}) = M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + 7M(\text{O}) \tag{2}$$

bu yerda M(Y), M(Ba), M(Cu) va M(O) – mos ravishda ittriy, bariy, mis va kislorodning molyar massalari. Kislorod tanqis namunalarda har bir formula birligiga x ta ($x \equiv \delta$) kislorod atomi kam to‘g‘ri kelgani uchun ularning molyar massasi M(YBCO) quyidagicha bo‘ladi:

$$M(\text{YBCO}) = M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + (7 - x)M(\text{O}) \tag{3}$$

Namuna massasi undagi mollar sonining birikma molyar massasiga ko‘paytmasiga teng. Shu sababli namunaning dastlabki massasi m_i quyidagicha ifodalanadi:

$$m_i = N_i\,[M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + 7M(\text{O})] \tag{4}$$

Yuqori haroratli tavlanishdan so‘ng kislorod tanqis namunaning yakuniy massasi m_f quyidagicha bo‘ladi:

$$m_f = N_i\,[M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + (7 - x)M(\text{O})] \tag{5}$$

$N_i = N_f \equiv N$ ekanligini hisobga olib, massa o‘zgarishi $\Delta m = m_i - m_f$ uchun quyidagini olamiz:

$$\Delta m = xNM(\text{O}) \tag{6}$$

(6) tenglamani kislorod yo‘qotilishi x ga nisbatan yechib, quyidagini hosil qilamiz:

$$x = \frac{\Delta m}{NM(O)} \tag{7}$$

Kislorod tanqis namunalardagi kislorod miqdorining noaniqligi xatoliklarning tarqalish (dispersiya) formulasidan aniqlanadi:

$$\delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \Delta m}\right)^2 (\delta(\Delta m))^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \mathrm{N}}\right)^2 (\delta \mathrm{N})^2} \tag{8}$$

bu yerda δx, $\delta(\Delta m)$ va δN – mos ravishda kislorod yo‘qotilishi, massa o‘zgarishi va mollar sonining noaniqliklari. M(O) ning noaniqligi nolga teng deb qabul qilinadi.

$$N = \frac{m_i}{M(Y123)} \tag{9}$$

Mollar sonining noaniqligi quyidagicha hisoblanadi:

$$\delta N = \frac{\delta m_i}{M(Y123)} = \frac{\delta m_i}{m_i} N \tag{10}$$

(10) dagi oxirgi tenglik (9) dan kelib chiqadigan M(Y123) = m_i/N munosabatiga asoslanadi. (8) ifodadagi ildiz ostida turgan xususiy hosilalar quyidagicha aniqlanadi:

$$\frac{\partial x}{\partial \Delta m} = \frac{1}{NM(O)} \tag{11}$$

va

$$\frac{\partial x}{\partial N} = -\frac{\Delta m M(O)}{(NM(O))^2} \tag{12}$$

Massa o‘zgarishi noaniqligining kvadrati:

$$(\delta(\Delta m))^2 = (\delta m_i)^2 + (\delta m_f)^2 \tag{13}$$

(10)–(13) ifodalardan foydalanib, (8) tenglamani quyidagicha qayta yozish mumkin:

$$\delta x = \sqrt{\left(\frac{1}{NM(O)}\right)^2 \left[(\delta m_i)^2 + \left(\delta m_f\right)^2\right] + \left[\frac{\Delta m M(O)}{(NM(O))^2}\right]^2 \left(\frac{\delta m_i}{m_i} N\right)^2} =$$

$$\frac{1}{NM(O)} \sqrt{(\delta m_i)^2 + (\delta m_f)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m_i}\right)^2 (\delta m_i)^2} \tag{14}$$

$\Delta m/m_i \sim 10^{-2}$ bo‘lgani uchun $(\Delta m/m_i)^2(\delta m_i)^2 \ll (\delta m_i)^2$, $(\delta m_f)^2$ bo‘ladi, ya’ni bu hadni hisobga olmaslik mumkin. Shunday qilib, kislorod miqdorining noaniqligi quyidagiga teng:

$$\delta x \approx \frac{1}{NM(O)} \sqrt{(\delta m_i)^2 + (\delta m_f)^2} \tag{15}$$

Namuna massasini o‘lchash noaniqligi quyidagicha qabul qilindi:
$\delta m_i = \delta m_f = \delta m = 0{,}2$ mg, garchi o‘lchashlarda foydalanilgan analitik tarozining sezgirligi 0,1 mg bo‘lsa-da. Bu qiymat o‘lchash jarayonida tarozi raqamli ko‘rsatkichida kuzatilgan tebranishlarni hisobga olish maqsadida tanlandi. Shu sababli:

$$\delta x = \frac{\sqrt{2}\delta m}{NM(O)} \tag{16}$$

(7) formula yordamida $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ namunadagi kislorod tanqisligi x (ya’ni δ), (16) formula yordamida esa uni aniqlash noaniqligi δx hisoblanadi.

Bi2212 namunalarini olish uchun ham qattiq fazali reaksiya usuli qo‘llanildi. Boshlang‘ich komponentlar Bi–Sr–Ca–Cu–O tizimiga muvofiq tanlandi. Shu

maqsadda yuqori tozalikdagi Bi_2O_3 (99,9 %), $SrCO_3$ (99,9 %), CaO (99,9 %) va CuO (99,9 %) kukunlari mos nisbatlarda olindi. $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ formulasi asosida tayyorlangan umumiy massasi 10 g bo‘lgan kukun aralashmasidagi komponentlarning massalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Aralashmadagi boshlang‘ich komponentlarning massalari.

№	Komponent (n = 2)	Massasi, g
1	Bi_2O_3	5,761177
2	$SrCO_3$	2,908644
3	CaO	0,346672
4	CuO	0,983507

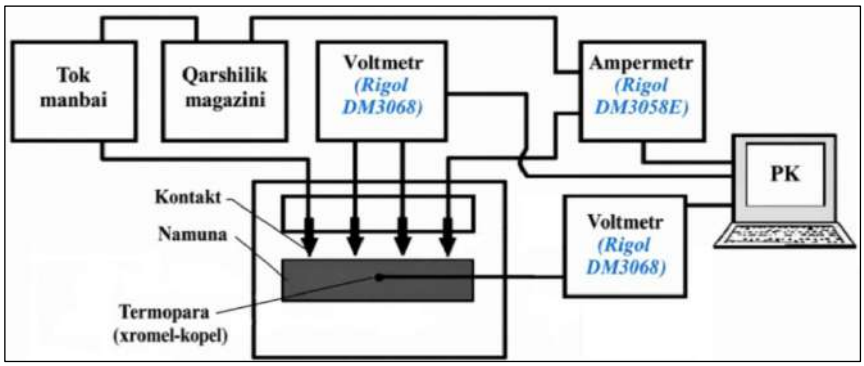
Boshlang‘ich reagentlar sifatida Bi_2O_3, $SrCO_3$, CaO va CuO kukunlari Bi:Sr:Ca:Cu = 2:2:1:2 stexiometrik nisbatda tarozida tortib olinib, komponentlar orasida kimyoviy va granulometrik bir jinslilikni ta’minlash maqsadida agat hovonchada puxta maydalandi hamda gomogen aralashma holatiga keltirildi. Tayyorlangan kukun aralashmasi dastlab 705 °C haroratda 12 soat davomida kalsinatsiya qilinib, karbonat komponentlarning termik parchalanishi hamda Bi–Sr–Ca–Cu–O tizimida dastlabki qattiq fazali reaksiyalarning boshlanishi ta’minlandi. Shundan so‘ng namuna pech ichida tabiiy sharoitda 12 soat davomida sovitildi, qayta maydalab gomogenlashtirildi va faza hosil bo‘lish jarayonini chuqurlashtirish maqsadida 780 °C haroratda 12 soat davomida takroriy termik ishlovdan o‘tkazildi. Keyingi bosqichda kukun yana maydalandi, gidravlik press yordamida diametri 10 mm va qalinligi 5 mm bo‘lgan silindrsimon tabletka shaklida presslandi hamda yakuniy sinterlash 880 °C haroratda 12 soat davomida amalga oshirildi. Sinterlashdan so‘ng namuna tabiiy sharoitda 15 soat davomida sovitilib, keyingi strukturaviy, Raman spektroskopik va elektr transport tahlillari uchun Bi2212 kuprat keramikasi olindi.

Tadqiqotda olingan namunalarning kristall tuzilishi, fazaviy tarkibi, panjara parametrlari va kristallografik orientatsiyasini aniqlash maqsadida rentgen difraksiyasi (XRD) usuli yordamida tahlil qilingan. Namunalardagi kristall panjara tebranishlari (fonon modalari), kimyoviy bog‘lar holati va strukturaviy tartib darajasini aniqlash maqsadida Raman spektroskopiyasi usuli qo‘llanilgan.

Y123 va Bi2212 namunalarining o‘ta o‘tkazuvchan holatga o‘tish kritik harorati elektr qarshilikni o‘lchashning to‘rt kontaktli usuli yordamida aniqlangan. Mazkur usulda tashqi ikkita kontakt orqali namunadan kichik qiymatli elektr toki o‘tkazilib, ichki ikkita kontakt orasidagi potensiallar farqi alohida qayd etilgan. Bunday o‘lchash sxemasi kontakt qarshiliklari, ulanish simlari qarshiligi hamda elektrod–namuna chegarasida yuzaga keladigan qo‘shimcha potensial tushuvlarning ta’sirini bartaraf etib, ayniqsa past qarshilikli va o‘ta o‘tkazuvchan holatga o‘tuvchi materiallarda yuqori aniqlikdagi natijalarni olish imkonini beradi. To‘rt kontaktli usulda elektr qarshilikni o‘lchash sxemasi 3-rasmda keltirilgan.

Harorat pasayishi davomida kuchlanishning tokka nisbati asosida $R(T) = U(T)/I$ bog‘lanishi olindi va qarshilikning keskin kamayishi kuprat namunalarda normal holatdan o‘ta o‘tkazuvchan holatga fazaviy o‘tish mezoni sifatida qabul qilindi. Kritik harorat $T_{c,boshlanish}$ (o‘tish boshlanishi), T_c (o‘tishning o‘rta nuqtasi) va

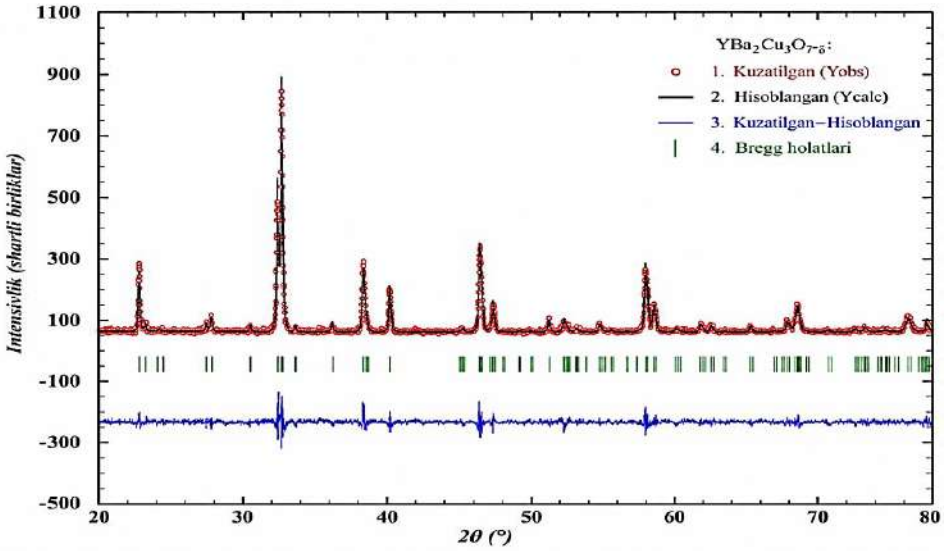
$T_{c,yakun}$ (qarshilikning nolga tenglashishi) parametrlari asosida aniqlanib, o‘tish kengligi ΔT orqali namunalarning fazaviy bir jinsliligi, donalararo elektr bog‘lanish darajasi, kristall strukturadagi nuqsonlar va kislorod stexiometriyasining transport xossalarga ta’siri tahlil qilingan.



3-rasm. To‘rt kontaktli usulda *R*(*T*) bog‘lanishini o‘lchash sxemasi.

Dissertatsiya ishining **“$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ va $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ kupratlarining strukturaviy tahlili”** deb nomlangan uchinchi bobida tadqiqot obyekti sifatida tanlangan kuprat namunalarning kristall tuzilishi, fazaviy tarkibi, o‘ta o‘tkazuvchi fazaning shakllanish xususiyatlari hamda lokal strukturaviy holati rentgen difraksiyasi (XRD) va Raman spektroskopiyasi usullari asosida kompleks tahlil qilingan.

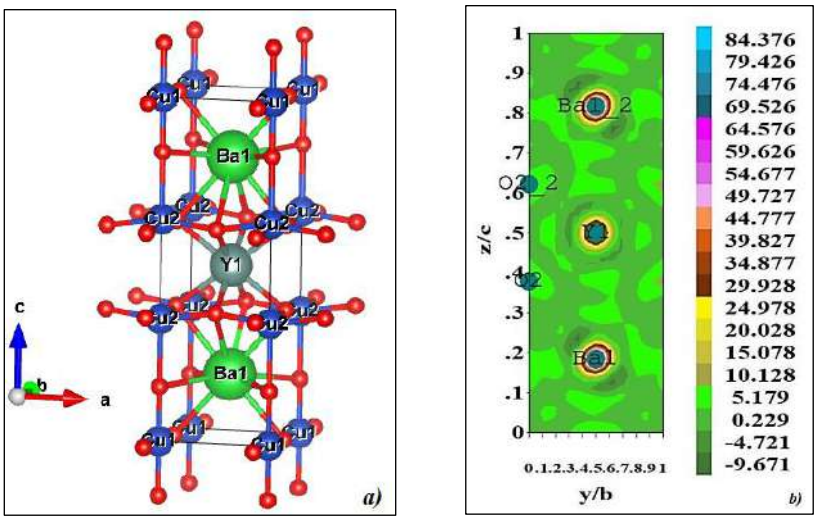
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ namunasi rentgen difraktogrammasi Rietveld strukturaviy aniqlashtirish usuli yordamida tahlil qilingan. Olingan difraktogrammada tajribaviy (Y_{obs}) va hisoblangan (Y_{calc}) profillarning o‘zaro mos kelishi tanlangan kristallografik modelning namunadagi asosiy fazani yetarli darajada ifodalashini ko‘rsatdi. Bragg reflekslarining joylashuvi namunaning ortorombik kristall sistemaga mansub *Pmmm* fazoviy guruhida kristallanganini bildiradi. Aniqlangan panjara parametrlari a = 3,82067 Å, b = 3,88769 Å va c = 11,68145 Å bo‘lib, elementar katakcha hajmi V = 173,511 Å^3 ni tashkil etdi. a va b parametrlarining farqlanishi namunada ortorombik deformatsiya mavjudligini va Cu–O zanjirlarida kislorod atomlarining tartiblangan joylashuvini ko‘rsatadi (4-rasm).



4-rasm. Y123 namunasi rentgen difraktogrammasining Rietveld usulidagi tahlili.

Strukturaviy modelda CuO_2 tekisliklaridagi Cu2–O2 va Cu2–O3 bog‘lari mos ravishda 1,9293 Å va 1,9609 Å, Cu–O zanjiridagi Cu1–O1 masofasi 1,9441 Å, apikal Cu2–O4 masofasi esa 2,2967 Å ekanligi aniqlangan. Atomlarning aniqlashtirilgan koordinatalari asosida hisoblangan Cu2–O2–Cu2 va Cu2–O3–Cu2 bog‘ burchaklari mos ravishda ≈163,9° va ≈165,0° ni tashkil etadi, bu CuO_2 tekisliklarining biroz egilganligini (buckling) ko‘rsatadi. Ushbu bog‘ uzunliklari Y123 tizimiga xos qatlamli kuprat strukturasi, CuO_2 o‘ta o‘tkazuvchi tekisliklari va Cu–O zaryad-rezervuar zanjirlari shakllanganini tasdiqlaydi (5-rasm, a).

Kristall tuzilish bilan birgalikda rentgen difraksiyasi natijalari asosida Furye elektron zichlik xaritasi ham hisoblandi. Unda Ba, Y, Cu va O atomlariga mos maksimumlarning aniqlanishi tanlangan atom koordinatalarining fizik jihatdan asoslanganligini ko‘rsatdi (5-rasm, b).



5-rasm. *a*) Y123 namunasining kristall tuzilishi; *b*) elektron zichlik taqsimoti (Furye elektron zichlik xaritasi).

Furye elektron zichlik xaritasini qurish rentgen nurlarining kristall panjara atomlari elektron bulutlarida sochilishiga asoslanadi. Difraksiya reflekslaridan olingan strukturaviy amplitudalar asosida kristall ichidagi elektron zichlik taqsimoti Furye yig‘indisi orqali tiklanadi:

$$\rho(x,y,z) = \frac{1}{V}\sum_{hkl} F(hkl)\exp[-2\pi i(hx+ky+lz)] \qquad (17)$$

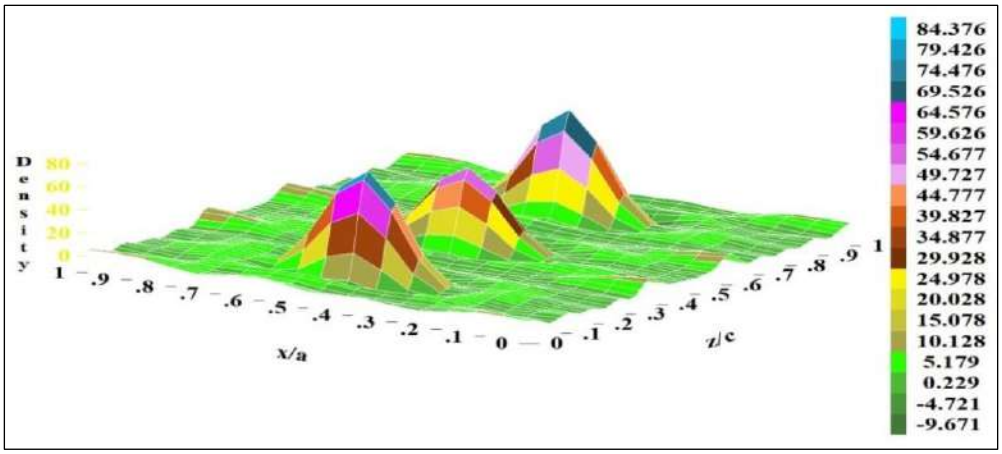
Bu yerda:

$\rho(x,y,z)$ – elektron zichlik, V – elementar katakcha hajmi,

$F(hkl)$ – strukturaviy faktor, h, k, l – Miller indekslari,

x, y, z – atomlarning kasr (fraksion) koordinatalari.

Furye xaritasida kuzatilgan cho‘qqilarning balandligi atomlarning rentgen nurlarini sochish qobiliyatiga, ya’ni ulardagi elektronlar soniga bog‘liq. Y123 tarkibidagi og‘ir atomlar yengil atomlarga nisbatan yuqoriroq elektron zichlik maksimumlarini hosil qiladi. Shu sababli xaritadagi eng baland cho‘qqilar Ba va Y atomlariga, o‘rtacha intensivlikdagi cho‘qqilar Cu atomlariga, past intensivlikdagi cho‘qqilar esa kislorod atomlariga mos keladi (6-rasm).



6-rasm. Furye elektron zichligining *x/a* va *z/c* kasr koordinatalari bo‘yicha taqsimoti.

Ortorombiklik darajasi quyidagicha baholangan:

$$\eta = \frac{b-a}{b+a} \cdot 100\ \%\,, \quad \eta = \frac{3{,}88769-3{,}82067}{3{,}88769+3{,}82067} \cdot 100\ \% \approx 0{,}869\ \%$$

Bu qiymat namunada o‘ta o‘tkazuvchanlik uchun qulay bo‘lgan ortorombik tuzilish mavjudligini ko‘rsatadi.

2-jadval. Rietveld tahlili asosida aniqlangan Y123 namunasining strukturaviy parametrlari.

№	Atom	*x*	*y*	*z*	To‘ldirilish	*B*, Å^2	Zaryad	Ko‘plik
1	Y1(Y)	0,5	0,5	0,5	1	0,726	0	1
2	Ba1(Ba)	0,5	0,5	0,18393	1	0,979	0	2
3	Cu1(Cu)	0	0	0	1	0,908	0	1
4	Cu2(Cu)	0	0	0,35501	1	0,726	0	2
5	O1(O)	0	0,5	0	0,91	0,908	0	1
6	O2(O)	0,5	0	0,37819	1	0,816	0	2
7	O3(O)	0	0,5	0,37693	1	0,655	0	2
8	O4(O)	0	0	0,1584	1	1,005	0	2

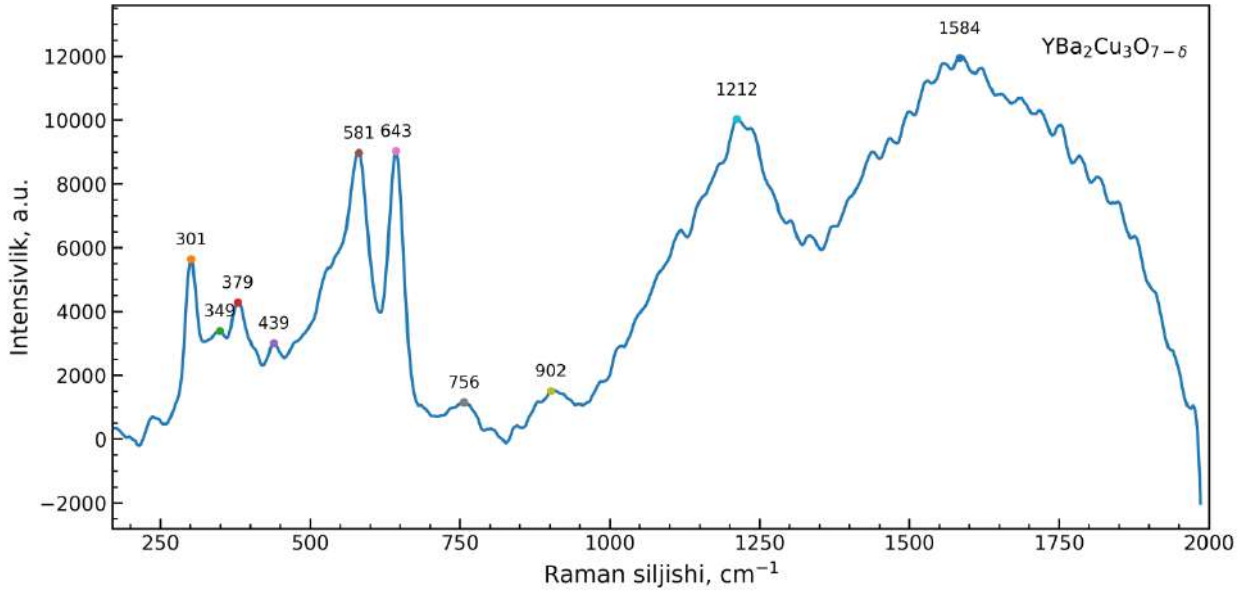
2-jadvalda keltirilgan kislorod pozitsiyalarining to‘ldirilish darajalari (*g*) asosida Y123 namunasi uchun kislorod stexiometriyasi zanjir, tekislik va apikal kislorod pozitsiyalarining hissalarini yig‘ish orqali quyidagicha hisoblandi:

$$O_{umumiy} = 2\cdot(O4) + 2\cdot(O3) + 2\cdot(O2) + 1\cdot(O1) = 2 + 2 + 2 + 0{,}91 = 6{,}91$$

Natijada umumiy kislorod miqdori $O_{umumiy} = 6{,}91 \pm 0{,}01$ ga teng bo‘lib, bu $\delta \approx 0{,}09$ kislorod tanqisligiga mos keladi va optimal kislorodlangan o‘ta o‘tkazuvchan fazaga xosdir.

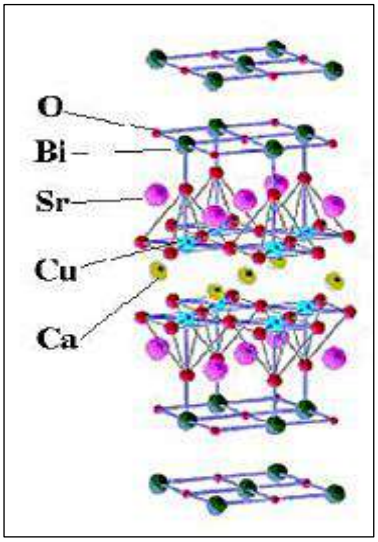
Raman spektral tahlilida o‘lchangan spektr diapazoni taxminan 173–1986 sm^{-1} oralig‘ini qamrab olgani sababli past chastotali 10–300 sm^{-1} soha faqat qisman baholandi; bu soha kristall panjara tebranishlari, og‘ir ionlarning kollektiv harakati va past energiyali fonon modalari bilan bog‘liq. Asosiy diagnostik ma’lumotlar 300–1800 sm^{-1} oralig‘idagi o‘rta chastotali “fingerprint/fonon” sohasida kuzatildi. Xususan, 301, 349, 379 va 439 sm^{-1} atrofidagi modalar Cu–O asosli panjara tebranishlari, CuO_2 tekisliklari va planar kislorod atomlarining lokal

tebranish holatini ifodalasa, 581 va 643 sm^{-1} atrofidagi kuchli Raman modalari kislorod subpanjarasi, Cu–O zanjirlari hamda apikal kislorod muhitiga sezgir fonon tebranishlari bilan bog‘liq deb talqin qilindi. 756 va 902 sm^{-1} atrofidagi kuchsiz polosalar, shuningdek, 1212 va 1584 sm^{-1} atrofidagi keng spektral komponentlar birinchi tartibli asosiy fononlardan ko‘ra nuqsonlar ta’sirida faollashgan, kombinatsion yoki yuqori tartibli Raman sochilish jarayonlari bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin (7-rasm).



7-rasm. Y123 kupratining Raman spektri (*t* = 21 °C).

$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212) kuprati yuqori darajada anizotrop qatlamli tuzilishga ega bo‘lib, uning difraktogrammasida xarakterli (00*l*) reflekslari kichik burchaklarda (*l* = 2, 4, 6, 8, …) kuzatiladi. Asosiy (002) maksimum $2\theta \approx 5{,}7°$ da joylashgan bo‘lib, bu $c \approx 30{,}8$ Å ga mos keladi. Bunday katta *c* parametri Bi2212 ning qatlamli tabiati va qatlamlar orasidagi katta masofani aks ettiradi (8-rasm).



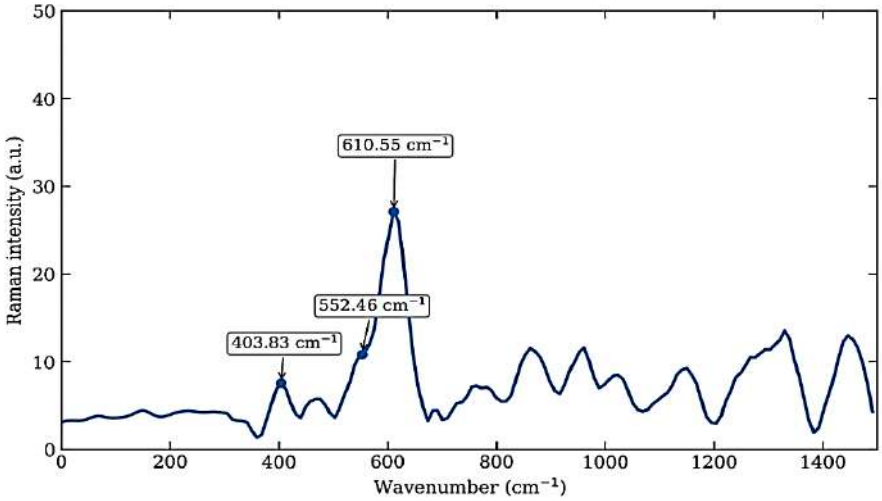
8-rasm. Bi2212 kupratining kristall tuzilishi (tetragonal *I*4/*mmm* modeli).

Bi2212 ning kristall tuzilishi odatda tetragonal *I*4/*mmm* fazoviy guruhi (o‘rtachalangan tuzilma) yoki undan past simmetriyali ortorombik *Fmmm* fazoviy

guruhi doirasida tavsiflanadi. Tuzilmada har bir formula birligiga Ca qatlami bilan ajratilgan ikkita CuO_2 tekisligi to‘g‘ri keladi.

Bi2212 fazasi tor harorat va tarkib oralig‘ida barqaror bo‘lib, uni $c \approx 30{,}8$ Å ga mos keladigan xarakterli (00*l*) reflekslari orqali identifikatsiya qilish mumkin.

Raman spektrida 552,46 sm^{-1} da kuzatilgan cho‘qqi Bi–O bog‘ining valent (cho‘zilish) tebranishlariga mos keladi deb talqin qilinadi. 610,55 sm^{-1} dagi cho‘qqi Cu–O bog‘ining valent tebranishlarini, 403,83 sm^{-1} da qayd etilgan cho‘qqi esa Ca–O bog‘ tebranishlarini ifodalaydi. Bu namunada Bi2212 fazasiga xos kimyoviy bog‘lar mavjudligini ko‘rsatadi (9-rasm).



9-rasm. Bi2212 namunasining Raman spektri.

Y123 va Bi2212 kupratlarining kristall tuzilishlarini tizimli taqqoslash ularning o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalaridagi farqlarni tushunish uchun muhim ahamiyatga ega (3-jadval).

3-jadval. Y123 va Bi2212 kupratlarining strukturaviy parametrlarini qiyoslash.

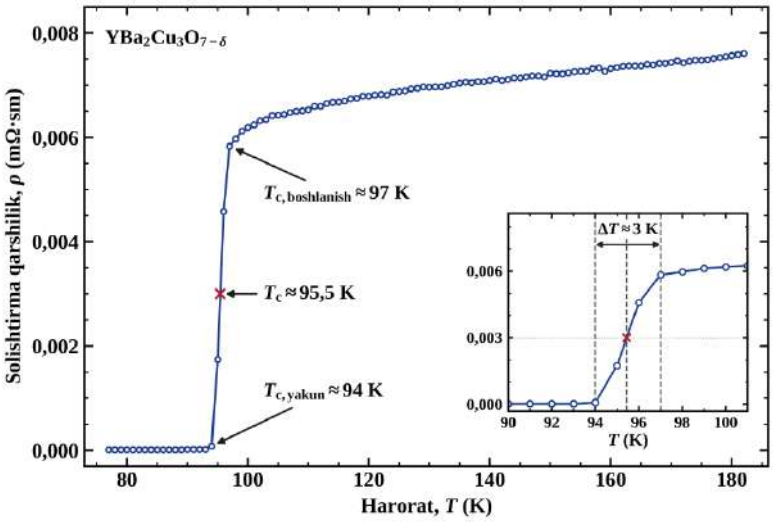
Parametr	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$
Fazoviy guruh	*Pmmm* (ortorombik)	*Fmmm* (psevdotetragonal)
a (Å)	3,82067	5,414
b (Å)	3,88769	5,418
c (Å)	11,68145	30,78
Elementar katakcha hajmi ($Å^3$)	173,511	902,1
CuO_2 tekisliklari soni	2 (ikki qatlamli)	2 (ikki qatlamli)
CuO_2 qo‘sh qatlamlari orasidagi masofa (Å)	11,68	15,39
Cu–O (tekislikda) (Å)	1,93–1,96	1,90–1,92
Cu–O (apikal) (Å)	2,30	2,40
$T_{c,max}$ (K)	91–95,5	90–95
ρ_c/ρ_{ab}	~50	10^4–10^5

Bu ikki kupratning kritik haroratlari bir-biriga yaqin bo‘lishiga qaramay, ulardagi o‘ta o‘tkazuvchanlik turli strukturaviy omillar bilan belgilanadi: Y123 da asosiy rolni Cu–O zanjirlaridagi kislorod tartiblanishi va ortorombik deformatsiya o‘ynasa, Bi2212 da esa katta *c* parametrli qatlamli (psevdotetragonal) tuzilma, Bi–O rezervuar qatlamlari va CuO_2 tekisliklarining kuchli ikki o‘lchamli xarakteri hal

qiluvchi ahamiyatga ega.

Dissertatsiya ishining **“$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ va $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ kupratlarining o‘ta o‘tkazuvchanlik xossalariga kristall tuzilish va olish texnologiyasining bog‘liqligi”** deb nomlangan to‘rtinchi bobida namunalarning o‘ta o‘tkazuvchan holatga o‘tishi, elektr xossalari va ularga ta’sir qiluvchi omillar tajriba natijalari asosida tahlil qilinib, parametrlarning o‘zaro korrelyatsiyasi aniqlangan.

To‘rt kontaktli usulda o‘lchangan qarshilik taxminan 97 K da keskin kamaya boshlaydi ($T_{c,boshlanish}$). Qarshilik qiymati taxminan 94 K da nolga tenglashadi ($T_{c,yakun}$), o‘tishning o‘rta nuqtasi esa T_c = 95,5 K da kuzatiladi. Taxminan ΔT = 3 K ga teng bo‘lgan tor o‘tish oralig‘i namunaning yaxshi kompozitsion bir jinsliligini ko‘rsatadi. Bundan tashqari, o‘tishdan biroz yuqori haroratlarda normal holat qarshiligining pastligi donalararo bog‘lanishning kuchliligi va mikrostrukturaviy tartiblanganlikning yuqori darajasini tasdiqlaydi (10-rasm).



10-rasm. Y123 namunasi uchun elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi (T_c = 95,5 K, ΔT = 3 K).

Y123 namunasi uchun aniqlangan $T_c \approx$ 95,5 K qiymati adabiyotlarda keng qayd etilgan 91–93 K qiymatlardan 2–3 K yuqori. Shu sababli kritik haroratga aynan qaysi texnologik omillar hal qiluvchi ta’sir ko‘rsatishini aniqlash maqsadida qo‘shimcha namunalar seriyasini sintez qilish quyidagicha rejalashtirildi.

Sintez parametrlarining kritik harorat T_c ga ta’sirini o‘rganish maqsadida har bir parametr uchun uchtadan daraja (qiymat) tanlab olindi (4-jadval).

4-jadval. Y123 sintez parametrlarining tanlangan darajalari.

№	τ_1 (soat)	T_{cal} (°C)	τ_2 (soat)	T_{sin} (°C)	P (kgf/sm^2)	τ_3 (soat)
1	12	880	12	900	100	9,5
2	18	900	18	920	150	10,5
3	24	920	24	940	200	11,5

Bunda:

τ_1 – dastlabki qizdirish (kalsinatsiya) vaqti;

T_{cal} – dastlabki qizdirish (kalsinatsiya) harorati;

τ_2 – sinterlash vaqti;

T_{sin} – sinterlash harorati;

P – presslash bosimi;

τ_3 – sinterlashdan keyingi boshqariladigan sovitish vaqti.

Parametrlar ta'sirini to'liq o'rganish uchun MATLAB dasturi yordamida $3^6 = 729$ ta mumkin bo'lgan kombinatsiyadan iborat to'liq faktorli reja tuzildi. Buncha tajribani o'tkazish uzoq vaqt va katta mablag' talab qilgani sababli, tajribalar sonini kamaytirish uchun Taguchi L18 ortogonal matritsasi asosida 18 ta kombinatsiya tanlab olindi. Ushbu namunalar laboratoriyada sintez qilinib, ularning T_c qiymatlari o'lchandi.

Taguchi usuli bo'yicha tanlangan 18 ta tajriba sharoitida namunalar qattiq fazali reaksiya usulida bosqichma-bosqich sintez qilindi. Har bir tajribadagi sintez parametrlari va o'lchangan T_c qiymatlari 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval. Taguchi L18 ortogonal matritsasi bo'yicha sintez parametrlari va o'lchangan T_c, ΔT qiymatlari.

№	τ_1 (soat)	T_{cal} (°C)	τ_2 (soat)	T_{sin} (°C)	P (kgf/sm^2)	τ_3 (soat)	T_c (K)	ΔT (K)
1	12	880	12	900	100	9,5	95,3	9
2	18	900	18	920	150	9,5	93,1	5
3	24	920	24	940	200	10,5	88	9
4	12	880	18	920	200	9,5	90,5	8
5	18	900	24	940	100	10,5	92,3	7
6	24	920	12	900	150	9,5	92,2	5
7	12	900	12	940	150	9,5	92,4	4
8	18	920	18	900	200	11,5	92	6
9	24	880	24	920	100	9,5	93,2	2
10	12	920	24	920	150	9,5	91,1	5
11	18	880	12	940	200	9,5	92,3	4
12	24	900	18	900	100	11,5	91,2	5
13	12	900	24	900	200	10,5	93	4
14	18	920	12	920	100	11,5	92,1	4
15	24	880	18	940	150	11,5	87,8	5
16	12	920	18	940	100	11,5	89	7
17	18	880	24	900	150	10,5	95,5	3
18	24	900	12	920	200	11,5	92,5	3

Olingan tajriba natijalari asosida sintez omillarining T_c ga ta'sirini ifodalovchi regressiya modeli tuzildi. Natijalar oddiy chiziqli model bilan to'liq ifodalanmagani sababli chiziqli va kvadratik asosiy effektlarni o'z ichiga olgan empirik regressiya modeli tanlandi. Yakuniy model natural birliklarda quyidagicha ifodalanadi:

$$T_c = 91{,}304545 - 0{,}088889(\tau_1 - 18) - 0{,}042500(T_{cal} - 900) - 0{,}072500(T_{sin} - 920) - 0{,}047790(\tau_1 - 18)^2 - 0{,}002551(T_{cal} - 900)^2 + 0{,}062942(\tau_2 - 18)^2 + 1{,}122727(\tau_3 - 10{,}5)^2 \quad (18)$$

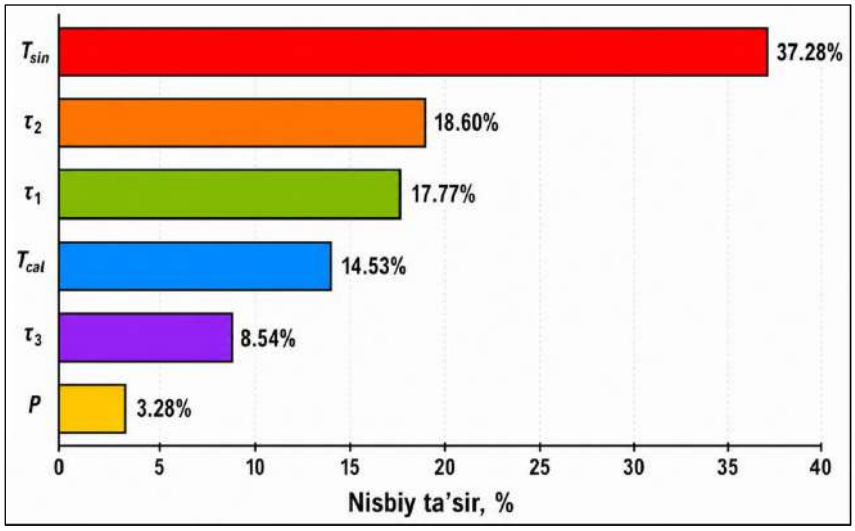
bu yerda T_c – kritik harorat, K; τ_1, τ_2, τ_3 – soat; T_{cal} va T_{sin} – °C. Presslash bosimi P yakuniy regressiya tenglamasiga kiritilmadi, chunki ushbu tajriba oralig'ida uning T_c ga mustaqil statistik ta'siri boshqa omillarga nisbatan juda kuchsiz bo'ldi.

6-jadval. Regressiya modelining aniqligi va statistik ko‘rsatkichlari.

Ko‘rsatkich	Qiymat
Tajriba soni	$n = 18$
Determinatsiya koeffitsiyenti	$R^2 = 0{,}911031$
Tuzatilgan determinatsiya koeffitsiyenti	$R^2_{adj} = 0{,}848753$
O‘rtacha kvadratik xatolik ildizi (RMSE)	0,6024 K
Qoldiqlarning standart xatoligi	0,8082 K
Bittadan qoldirib kross-validatsiya bo‘yicha o‘rtacha kvadratik xatolik ildizi (LOOCV)	1,0975 K
Modelning statistik ahamiyatlilik darajasi (*p*-qiymat)	$1{,}62 \cdot 10^{-4}$
Maksimal absolyut qoldiq	≈ 1,08 K

$R^2 \approx 0{,}91$ bo‘lishi model 18 ta tajribadagi T_c dispersiyasining katta qismini tushuntirishini ko‘rsatadi. LOOCV xatoligining 1,10 K atrofida bo‘lishi modelning tajriba nuqtalariga haddan tashqari moslashmaganini (overfitting yo‘qligini) va bashorat qilish qobiliyatiga egaligini bildiradi.

Sintez parametrlarining kritik haroratga nisbiy ta’sir ulushlari tuzatilgan dispersion tahlil (adjusted ANOVA) va nisbiy ahamiyatlilikni baholash (relative importance) usuli asosida normallashtirilgan holda aniqlandi. Natijada T_c ni boshqaruvchi asosiy omil sinterlash harorati ekanligi aniqlandi (11-rasm).



11-rasm. Y123 namunasini olish parametrlarining kritik haroratga nisbiy ta’siri.

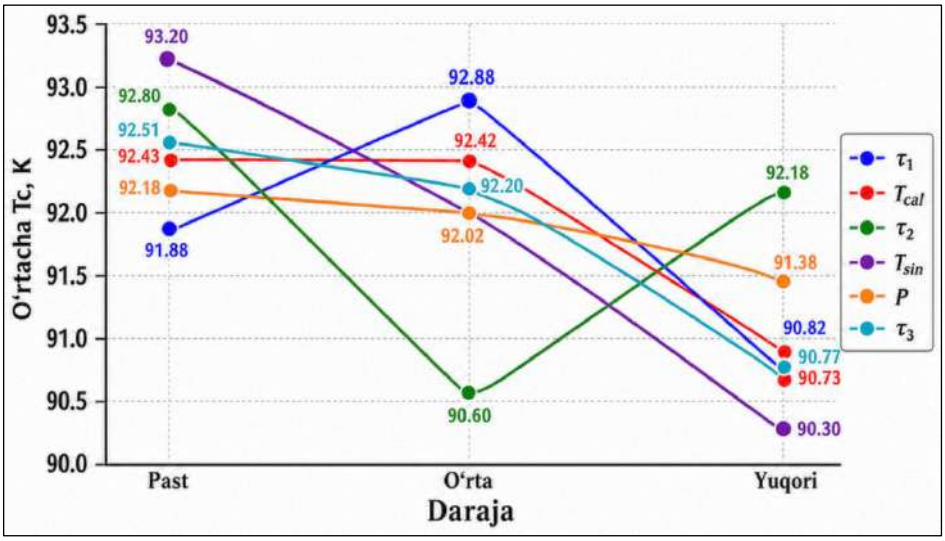
Tahlil natijalari T_c ga eng kuchli ta’sir ko‘rsatuvchi omil sinterlash harorati T_{sin} ekanini ko‘rsatdi: T_{sin} ning 900 °C dan 940 °C gacha oshirilishi o‘rtacha T_c ning 93,2 K dan 90,3 K gacha pasayishiga olib keladi. Bu Y123 tizimida yuqori haroratli sinterlash jarayonida kislorod stexiometriyasining buzilishi, Cu–O zanjirlaridagi tartiblanishning susayishi, ikkilamchi fazalar hosil bo‘lishi yoki donalararo bog‘lanishning yomonlashishi bilan izohlanadi. Demak, yuqori T_c olish uchun sinterlash haroratini haddan tashqari oshirish maqsadga muvofiq emas.

Nisbiy ta’sirlarni baholash shuni ko‘rsatdiki, kritik haroratga sintez

parametrlarining ta’siri quyidagi tartibda kamayadi:

$$T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P.$$

Har bir parametrning past, o‘rta va yuqori darajalarida olingan o‘rtacha T_c qiymatlari bo‘yicha asosiy effektlar grafigi 12-rasmda keltirilgan.



12-rasm. Sintez parametrlarining turli darajalarida T_c ning o‘rtacha qiymatlari bo‘yicha asosiy effektlar grafigi.

$\boldsymbol{T_{sin}}$ – 900 °C da o‘rtacha T_c eng yuqori, 940 °C da esa sezilarli pasayish kuzatiladi. Bu yuqori haroratda kislorod stexiometriyasining buzilishi, Cu–O zanjirlarida tartiblanishning susayishi, ikkilamchi fazalar hosil bo‘lishi yoki donalararo kontaktning yomonlashishi bilan izohlanadi;

$\boldsymbol{\tau_2}$ – bog‘lanish nochiziqli: 18 soatlik rejimda T_c pastroq, 12 va 24 soatlik rejimlarda esa yuqoriroq. Bu faza shakllanishi va kislorodlanish kinetikasining murakkab (nochiziqli) xarakterga ega ekanligini ko‘rsatadi;

$\boldsymbol{\tau_1}$ – 18 soat atrofida maksimum kuzatiladi. Juda qisqa vaqt faza shakllanishi uchun yetarli bo‘lmasligi, juda uzoq vaqt esa zarrachalarning o‘sishi yoki keyingi kislorodlanish samaradorligining pasayishiga olib kelishi mumkin;

$\boldsymbol{T_{cal}}$ – 880–900 °C oralig‘i qulay, 920 °C esa T_c ni kamaytiradi. Yuqori haroratdagi kalsinatsiya kukun reaktivligi va lokal stexiometriyaga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin;

$\boldsymbol{\tau_3}$ – ta’siri mavjud, biroq uning statistik ishonchliligi T_{sin}, τ_2 va τ_1 ga nisbatan past. Shu sababli uni yordamchi texnologik parametr sifatida baholash maqsadga muvofiq;

$\boldsymbol{P}$ – presslash bosimining T_c ga bevosita ta’siri eng kichik. Biroq u zichlik, donalararo kontakt, mexanik mustahkamlik va ΔT kengligiga bilvosita ta’sir qilishi mumkin.

Kislorod miqdori optimal bo‘lgan $YBa_2Cu_3O_{6,91}$ namunasida o‘ta o‘tkazuvchanlikning yuqori kritik harorati kristall panjaraning makroskopik parametrlarigagina emas, balki CuO_2 tekisliklari va zaryad rezervuari qatlamlari o‘rtasidagi lokal bog‘lanish geometriyasiga ham bog‘liq. Apikal Cu2–O4 bog‘ uzunligining 2,2967 Å ga tengligi, Cu–O zanjirlarining tartiblangan holati va Cu–

O–Cu bog‘ burchaklarining optimal qiymatlari (≈164–165°) Cu 3*d* va O 2*p* orbitallarining samarali gibridlanishini, CuO_2 tekisliklariga zaryad tashuvchilar uzatilishini va ularning tekislik bo‘ylab harakatchanligini kuchaytiradi. Mazkur strukturaviy holat natijasida T_c = 95,5 K va ΔT = 3 K tor o‘tish oralig‘iga ega barqaror o‘ta o‘tkazuvchan faza shakllangan.

Olingan natijalar apikal Cu–O bog‘ masofasi va Cu–O–Cu burchagini Y123 kupratlarining o‘ta o‘tkazuvchanlik sifatini baholovchi strukturaviy indikatorlar sifatida qo‘llash mumkinligini ko‘rsatadi. Shuningdek, ushbu parametrlarni kislorod miqdori va termik ishlov berish rejimi orqali maqsadli boshqarish Y123 materiallarida kritik haroratni oshirish va o‘ta o‘tkazuvchan fazaning barqarorligini ta’minlashning samarali ilmiy-texnologik yo‘li ekanligi asoslandi.

Meyssner effekti va magnit levitatsiyasining kuzatilishi

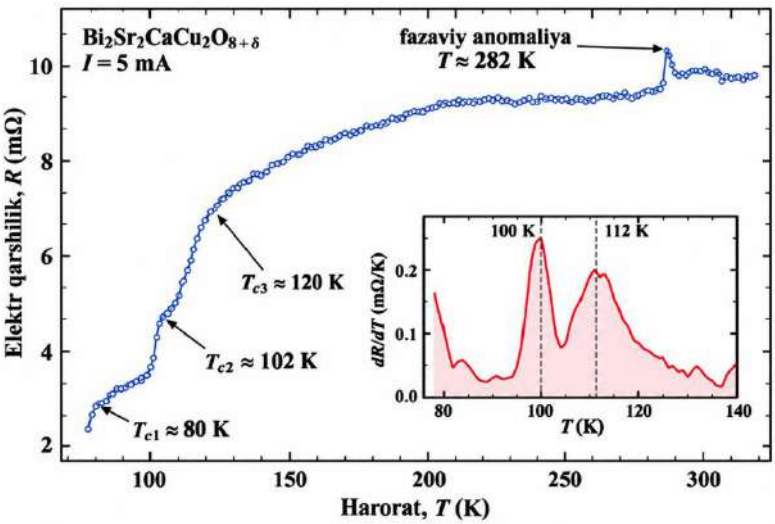
Sintez qilingan Y123 namunasining o‘ta o‘tkazuvchanlik xususiyatlarini sifat jihatidan tasdiqlash maqsadida uning Meyssner javobi magnit levitatsiya tajribasi orqali tekshirildi. Ushbu tajribada 10×10×10 mm o‘lchamli N38 markali 8 ta neodimli (NdFeB) doimiy magnitdan foydalanildi. Suyuq azotda sovitilgan o‘ta o‘tkazgich namuna ushbu magnitlar maydonida 13-rasmda ko‘rsatilganidek barqaror muallaq (levitatsiya) holatda turdi. Bu kritik haroratdan pastda Meyssner effektiga xos bo‘lgan magnit oqimining namunadan kuchli siqib chiqarilishini yaqqol namoyon etadi (II tur o‘ta o‘tkazgichlarda levitatsiyaning barqarorligiga magnit oqimi uyurmalarining pinningi ham hissa qo‘shadi).

13-rasm. Suyuq azotda (77 K) sovitilgan Y123 namunasining NdFeB magnitlari ustida barqaror levitatsiyasi (Meyssner effektining namoyon bo‘lishi).

$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212) kupratining kristall tuzilishi va o‘ta o‘tkazuvchanligi.

Elektr transport xossalari

Bi2212 namunasining elektr qarshiligi 3-rasmda keltirilgan to‘rt kontaktli sxema bo‘yicha o‘lchandi. Namuna suyuq azotning qaynash haroratigacha (T = 77 K) sovitildi va u orqali 5 mA qiymatdagi doimiy tok o‘tkazildi. Qarshilikning haroratga bog‘liqligi Rigol DM3068 va Rigol DM3058E multimetrlari yordamida potensiallar farqini o‘lchash orqali aniqlandi.



14-rasm. Bi2212 o‘ta o‘tkazuvchan namunasi uchun elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi.

Harorat xromel–kopel termojufti yordamida qayd etildi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, harorat oshishi bilan qarshilikning o‘zgarishida bir nechta sakrashsimon o‘tishlar kuzatiladi. Ushbu o‘tishlarga mos haroratlar mos ravishda T_{c1} = 80 K, T_{c2} = 102 K va T_{c3} = 120 K ni tashkil etdi. Taxminan T = 282 K da grafikda yaqqol cho‘qqi paydo bo‘ladi, bu namunada fazaviy o‘zgarish (anomaliya) sodir bo‘lishini ko‘rsatadi.

Ilmiy adabiyotlar tahlili va o‘tkazilgan tadqiqotlarimiz natijalariga asoslanib, vismut asosli kupratlarni olish texnologiyasi murakkab jarayon ekanligi hamda kalsinatsiya va sinterlash bosqichlarida haroratni to‘g‘ri tanlash nihoyatda muhimligi aniqlandi. Vismut asosli kupratlardan bir fazali o‘ta o‘tkazgich olish uchun namunani uning qisman erish haroratiga juda yaqin haroratda sinterlash zarur.

O‘lchashlar suyuq azotning qaynash haroratidan (77 K) boshlab olib borilgani sababli qarshilikning nolga teng holati qayd etilmadi. Adabiyotlar tahliliga ko‘ra, bunday namunalarda R = 0 holatiga mos kritik harorat $T_c \leq 75$ K ni tashkil etadi. Biz tayyorlagan namunada esa harorat oshishi bilan qarshilikning ketma-ket sakrashsimon ortishi kuzatildi. Shu bilan birga, namunada xona haroratiga yaqin $T \approx 282$ K da fazaviy o‘zgarish qayd etildi.

XULOSA

1. Tizimli tajribalar asosida Y123 va Bi2212 kupratlarida o‘ta o‘tkazuvchan fazaning barqaror shakllanishini ta’minlovchi samarali harorat-vaqt rejimlari aniqlanib, Y123 uchun kalsinatsiya 880–920 °C da 12–18 soat, sinterlash 900–940 °C da 12–24 soat; Bi2212 uchun esa mos ravishda 760–840 °C da 18–24 soat va 830–850 °C da 12–24 soat davomida olib borilishi belgilandi. Ushbu termik rejimlarning fazaviy tarkibni barqarorlashtirishi hamda kritik harorat T_c qiymatining oshishi va takrorlanuvchanligini ta’minlashi ko‘p sonli tajribalar orqali asoslangan.

2. Y123 namunalarini sintez qilishda ko‘p bosqichli sovitish rejimining o‘ta o‘tkazuvchan faza shakllanishi va kislorod atomlarining kristall panjarada

tartiblanishiga samarali ta’siri aniqlandi. Bosqichma-bosqich sovitish kislorod diffuziyasini faollashtirib, kislorod vakansiyalarining qayta taqsimlanishini va Cu–O zanjirlarining tartiblanishini kuchaytirishi eksperimental tasdiqlangan.

3. Olingan namunalarning rentgen difraksion ma’lumotlari Rietveld usulida aniqlashtirilib, fazaviy tarkibi, kristall panjara simmetriyasi hamda ortorombik elementar katakchaning *a*, *b*, *c* parametrlari va hajmi aniqlandi. VESTA dasturi yordamida kristall tuzilmaning fazoviy modeli yaratilib, atomlarning panjaradagi koordinatsion joylashuvi, Cu–O bog‘ uzunliklari va Cu–O–Cu bog‘ burchaklari (≈164–165°) hamda Cu–O qatlamlarining strukturaviy holati vizuallashtirildi. Rentgen difraksiyasi ma’lumotlari asosida Furye elektron zichlik xaritasi tiklanib, atom pozitsiyalarining to‘g‘ri tanlanganligi hamda elektron zichlik taqsimotining mis–kislorod bog‘lari va kislorodning tartiblanish darajasi bilan bog‘liqligi ko‘rsatilgan.

4. Y123 kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichni sintezlash va termik ishlov berish parametrlarining kritik harorat T_c ga ta’siri eksperimental ravishda aniqlandi. Texnologik omillar bilan T_c o‘rtasidagi miqdoriy bog‘lanish regressiya tahlili asosida ifodalangan. Natijada namunalarning kritik haroratini oldindan baholash imkonini beruvchi, determinatsiya koeffitsiyenti R^2 = 0,91 bo‘lgan empirik regressiya modeli ishlab chiqilgan.

5. Y123 kupratli yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlarni sintez qilishda kritik harorat T_c ga ta’sir etuvchi texnologik omillar Taguchi usuli asosida baholanib, ularning nisbiy ta’sir darajasi $T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P$ ketma-ketligida ekanligi eksperimental aniqlandi. Natijalar sinterlash harorati va izotermik ushlab turish vaqtlarining faza shakllanishi, kislorod stexiometriyasi hamda T_c qiymatini belgilashda ustuvor ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatdi.

6. Sintez qilingan Y123 namunasida Meyssner effektining namoyon bo‘lishi eksperimental kuzatilib, uning o‘ta o‘tkazuvchanlik sifati magnit javob mezonlari asosida baholandi. Olingan natijalar o‘ta o‘tkazuvchan holat faqat elektr qarshilikning nolga tenglashishi bilan emas, balki kritik haroratdan pastda magnit oqimining namunadan siqib chiqarilishi orqali ham tasdiqlanishini ko‘rsatdi.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ БУХАРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТУРАЕВ ОЗОДЖОН ГАЙРАТ УГЛИ

Кристаллическая структура и сверхпроводимость купратов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) и $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212)

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Бухара – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под № B2025.1.PhD/FM1249.

Диссертация выполнена в Бухарском государственном университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.buxdu.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Тураев Акмал Атаевич** доктор философии по физико-математическим наукам, профессор
Официальные оппоненты:	**Астанов Салих Хусенович** доктор физико-математических наук, профессор
	Курбанов Улугбек Тажибаевич доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	**Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека**

Защита диссертации состоится «17» октября 2026 года в 10.00 часов на заседании Научного совета PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 при Бухарском государственном университете (Адрес: 200117, г. Бухара, ул. М. Икбола, дом 11. Тел.: (+99865) 221-30-46; факс: (+99865) 221-29-06; e-mail: buxdu_rektor@buxdu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского государственного университета (регистрационный номер 21034) (Адрес: 200117, г. Бухара, ул. М. Икбола, дом 11. Тел.: (+99865) 221-30-46.

Автореферат диссертации разослан «5» октября 2026 г.

(Протокол реестра рассылки № 2 от 5-октября 2026 г.).

М.З. Шарипов
Председатель научного совета по присуждению учёных степеней, д.ф.-м.н., профессор

Ш.Ш. Файзиев
Учёный секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, д.ф. ф.-м.н., доцент

Ш.А. Рахимов
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению учёных степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Неуклонный рост мирового спроса на электроэнергию, необходимость рационального использования энергетических ресурсов, снижения технических потерь в сетях передачи и распределения, а также создания высокоэффективных энергетических устройств ставят перед современным материаловедением и физикой конденсированного состояния важные научно-технические задачи. Особое значение в таких стратегических областях, как энергетика, медицинская диагностика, высокоточная измерительная техника, квантовые технологии, системы магнитной левитации и термоядерная энергетика, приобретают сверхпроводящие материалы, способные проводить электрический ток без сопротивления, стабильно работать в сильных магнитных полях и обеспечивать высокую плотность тока. Интенсивно развиваются научные исследования по созданию на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов кабелей для передачи электроэнергии, сверхпроводящих магнитов, ограничителей тока, систем накопления энергии в магнитном поле и современных электронных устройств. Оценка рынка сверхпроводящих проводов в 2025 году в 1,32 млрд долларов США и прогноз его роста до 2,19 млрд долларов США к 2030 году свидетельствуют о важном практическом значении данного направления не только для фундаментальной науки, но и для высокотехнологичной промышленности и инновационной энергетики[1].

В мире высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) материалы, в частности купраты иттрий–барий–медного оксида ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) и висмут–стронций–кальций–медного оксида ($Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+\delta}$), являются актуальными объектами исследований современного материаловедения и физики конденсированного состояния. Сложная корреляционная взаимосвязь сверхпроводящих свойств купратов Y123 и Bi2212 с кристаллической структурой, дефицитом кислорода и степенью легирования требует глубокого фундаментального изучения их физических механизмов. Критическая температура T_c, критическая плотность тока, закономерности изменения электрического сопротивления и стабильность сверхпроводящей фазы в этих материалах непосредственно зависят от содержания кислорода, фазового состава, параметров кристаллической решётки и условий термической обработки. Поэтому исследования, направленные на оптимизацию технологии получения купратов Y123 и Bi2212, управление их структурным состоянием, а также улучшение критической температуры и параметров сверхпроводимости, являются одной из важных научно-практических задач с точки зрения выявления и теоретического обоснования физических механизмов высокотемпературной сверхпроводимости, расширения возможностей практического применения и создания перспективных функциональных материалов.

В нашей республике особое значение придаётся научным исследованиям, направленным на рациональное использование

[1] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/superconducting-wire-market-226116096.html

энергетических ресурсов, развитие высокотехнологичных производств, а также создание новых функциональных материалов с управляемыми электрофизическими свойствами. В частности, в Стратегии «Узбекистан – 2030» определены важные задачи по «... повышению энергоэффективности отраслей экономики, широкому внедрению технологий «зелёной энергетики» и рациональному использованию ресурсов»[2]. Для реализации этих задач важное научно-практическое значение имеет углублённое исследование кристаллической структуры, фазового состава, кислородной стехиометрии, параметров кристаллической решётки и сверхпроводящих свойств высокотемпературных сверхпроводящих купратных материалов, в частности купратов Y123 и Bi2212. Поэтому исследования, направленные на управление параметрами кристаллической структуры купратов Y123 и Bi2212, а также на улучшение критической температуры и сверхпроводящих характеристик, имеют научно-практическое значение для создания перспективных функциональных материалов, снижающих потери энергии, для электротехники, криогенной электроники, магнитных систем и высокоэффективных энергетических устройств.

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Постановлением от 22 августа 2019 года № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», Указом от 29 октября 2020 года № УП-6097 «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года», Постановлением от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики», а также другими нормативно-правовыми документами, касающимися развития науки, энергоэффективности, современного материаловедения и высокотехнологичных исследований.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан II – «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. На современном этапе развития материаловедения, физики твёрдого тела и физики сверхпроводимости купратные высокотемпературные сверхпроводники составов Y123 и Bi2212 рассматриваются как одни из наиболее перспективных и фундаментально значимых сложных оксидных материалов. В ведущих научных центрах мира проводятся масштабные теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию технологии синтеза этих материалов, управлению кислородной стехиометрией и соотношением катионов, а также по выявлению влияния дефектов кристаллической решётки, межзеренных

[2] Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № УП-158 «О Стратегии «Узбекистан – 2030»».

границ, фазовой гетерогенности и процессов текстурирования на параметры сверхпроводимости. Научные результаты, полученные в этой области T. Horide (Япония), C.T. Lin (Германия), M. Nagao (Япония), D.C. Larbalestier (США), J.L. MacManus-Driscoll (Великобритания), J. Jiang (США), E.E. Hellstrom (США), G.D. Gu (США), H. Eisaki (Япония) и другими ведущими учёными, вносят важный вклад в более глубокое понимание закономерностей фазообразования, кристаллохимических особенностей, механизмов токопереноса и возможностей практического применения купратных высокотемпературных сверхпроводников.

Последовательные научные исследования, направленные на изучение фундаментальных физических свойств ВТСП и расширение возможностей их практического применения, проводятся и учёными нашей страны. В частности, Д.Р. Джураевым, С. Джумановым, Б.Я. Явидовым, Э.М. Ибрагимовой и Д. Гуламовой получены весомые научные результаты по исследованию теоретических и экспериментальных аспектов явления высокотемпературной сверхпроводимости, структурных изменений в купратах, динамики носителей заряда, а также магнитных и транспортных свойств.

Научные труды указанных учёных служат важной теоретической и практической основой для исследования синтеза, кристаллической структуры и электрофизических свойств купратных сверхпроводников Y123 и Bi2212. Анализ полученных в этих работах научных результатов показывает необходимость установления влияния температуры синтеза, режима термической обработки, содержания кислорода, фазового состава и параметров кристаллической решётки на критическую температуру T_c в процессе получения образцов Y123 и Bi2212, а также изучения корреляционных связей между их транспортными, магнитными и сверхпроводящими свойствами. Однако взаимосвязи между технологическими параметрами, структурными факторами и сверхпроводящими свойствами этих купратов до настоящего времени изучены недостаточно.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Бухарского государственного университета в рамках обеспечения исполнения Указа Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года № УП-6097 «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года».

Цель исследования заключается в определении влияния параметров технологии получения высокотемпературных купратных сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ на их кристаллическую структуру и сверхпроводящие свойства (критическую температуру).

Задачи исследования:

определение на основе экспериментов температурно-временных режимов, влияющих на фазообразование, формирование кристаллической структуры и стабилизацию кислородной стехиометрии в процессе синтеза

купратных высокотемпературных сверхпроводников Y123 и Bi2212;

выявление роли технологии многоступенчатого охлаждения в формировании сверхпроводящей фазы при синтезе образцов купратных высокотемпературных сверхпроводников состава Y123, исследование влияния каждой термической стадии процесса охлаждения на диффузию атомов кислорода по кристаллической решётке, их упорядочение в Cu–O-цепочках, перераспределение кислородных вакансий и переход из тетрагональной фазы в орторомбическую;

исследование кристаллической структуры полученных образцов на основе рентгенодифракционного анализа, определение по интенсивности, смещению и уширению дифракционных максимумов фазового состава, симметрии кристаллической решётки (орторомбическое или тетрагональное структурное состояние) и наличия структурных дефектов;

экспериментальное определение влияния параметров синтеза и термической обработки на критическую температуру T_c и формирование сверхпроводящего состояния, а также разработка эмпирической формулы на основе регрессии, описывающей зависимость T_c от технологических и структурных факторов;

экспериментальное определение на основе метода планирования экспериментов Тагути и регрессионного анализа относительного вклада основных технологических факторов, определяющих синтез купратных высокотемпературных сверхпроводников состава Y123, – температур кальцинации и спекания, времени изотермической выдержки, давления прессования и времени охлаждения после спекания – в величину T_c;

подтверждение формирования в материале истинной сверхпроводящей фазы путём экспериментального наблюдения эффекта Мейсснера в полученных образцах купратных высокотемпературных сверхпроводников.

Объектом исследования являются купраты $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) и $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212), полученные методом твёрдофазной реакции.

Предметом исследования являются закономерности изменения кристаллической структуры купратов Y123 и Bi2212 в зависимости от технологических параметров синтеза и содержания кислорода, структурное упорядочение в плоскостях CuO_2 и цепочках Cu–O, а также закономерности перехода в сверхпроводящее состояние и формирования критической температуры, установленные на основе рентгенодифракционного анализа, рамановской спектроскопии и температурной зависимости электрического сопротивления.

Методы исследования. В процессе исследования использованы метод твёрдофазной реакции, рентгеновская дифракция с уточнением структуры методом Ритвельда, рамановская спектроскопия, четырёхконтактный метод измерения электрического сопротивления, метод магнитной левитации, а также метод планирования экспериментов Тагути и регрессионный анализ.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

получен высокотемпературный сверхпроводящий образец состава $YBa_2Cu_3O_{6,91}$ с критической температурой $T_c = 95{,}5$ K, превышающей приводимые в литературе значения 91–93 K, и шириной перехода $\Delta T = 3$ K за

счёт целенаправленного изменения режимов кальцинации и спекания, кислородной среды и скорости охлаждения при твёрдофазном синтезе;

установлена количественная связь между технологическими параметрами синтеза купрата Y123 и его критической температурой и разработана эмпирическая регрессионная модель с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}91$, позволяющая с высокой достоверностью прогнозировать значение T_c;

на основе метода планирования экспериментов Тагути проведён комплексный факторный анализ влияния температур кальцинации и спекания, времени изотермической выдержки, давления прессования и времени охлаждения после спекания на критическую температуру купрата Y123 и экспериментально установлено, что относительная степень их влияния убывает в последовательности $T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P$;

в образцах Y123 с оптимальной кислородной стехиометрией экспериментально определены длина апикальной связи Cu2–O4 (2,297 Å) и углы связей Cu–O–Cu в плоскостях CuO_2 (≈ 164–165°), а также научно обоснована роль этих локальных структурных параметров в формировании критической температуры;

на температурной зависимости электрического сопротивления образца Bi2212 выявлены многоступенчатые переходы между сверхпроводящим и нормальным состояниями при 80, 102 и 120 K и фазовая аномалия вблизи 284 K, на основании чего обоснован многофазный состав образца.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

оптимизированы температурно-временные режимы, кислородная среда и условия охлаждения при твёрдофазном синтезе купрата Y123 и разработана технология получения образцов с высокой фазовой чистотой и стабильными сверхпроводящими свойствами;

на основе выявленных в образце Bi2212 переходов при 80, 102 и 120 K и аномалии вблизи 284 K предложены критерии контроля фазового состава и качества сверхпроводимости материала по температурной зависимости электрического сопротивления, а также разработаны режимы синтеза и термической обработки для получения образцов с высокой критической температурой;

разработана эмпирическая регрессионная формула, описывающая вклад параметров синтеза, определяющих формирование кристаллической решётки образца Y123, в критическую температуру и позволяющая с высокой точностью прогнозировать T_c.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием апробированных современных методов физики конденсированного состояния и материаловедения: рентгенодифракционного анализа фазового состава и кристаллической структуры образцов Y123 и Bi2212, структурного анализа длины апикальной связи Cu–O и углов связей Cu–O–Cu, определения критической температуры по температурной зависимости электрического сопротивления. Достоверность подтверждается также взаимной согласованностью данных о содержании кислорода,

структурных параметрах и сверхпроводящих свойствах и соответствием расчётных и экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в экспериментальном обосновании непосредственной зависимости достижения высокой критической температуры в купрате Y123 от технологических параметров синтеза, содержания кислорода и особенностей кристаллической структуры.

Практическая значимость результатов исследования заключается в научном обосновании оптимальных технологических параметров получения высокотемпературных сверхпроводящих образцов Y123 и Bi2212. Эти результаты служат научной основой для широкомасштабного производства данных материалов с требуемыми структурными и электрофизическими свойствами и их применения в энергетике, электротехнике и криогенной технике.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных при исследовании кристаллической структуры и сверхпроводимости высокотемпературных сверхпроводящих образцов Y123 и Bi2212:

результаты исследования магнитных свойств образцов Y123 и наблюдаемого в них эффекта Мейсснера использованы в научном проекте № FWES-2024-0001 «Поиск, синтез и исследование новых функциональных магнитных материалов и гибридных структур», выполняемом в 2021–2030 годах в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (справка Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН № 03-125 от 31 марта 2026 года). Использование этих научных результатов позволило выявить новые материалы с перспективными магнитными свойствами, целенаправленно управлять их структурными и функциональными параметрами, а также синтезировать материалы с высокими магнитными характеристиками;

эмпирическая регрессионная формула, описывающая вклад параметров синтеза образца Y123 в критическую температуру и позволяющая с высокой точностью её прогнозировать, использована при получении научных результатов совместного фундаментального научно-исследовательского проекта № MUK-2021-40 «Исследование и применение интеллектуальной (ИИ) системы сети возобновляемой энергетики на основе больших данных». Проект выполнен в 2022–2023 годах Андижанским машиностроительным институтом (ныне – Андижанский государственный технический институт) совместно с Северо-Китайским технологическим университетом (Китайская Народная Республика) (справка Андижанского государственного технического института № 01-03-404 от 29 января 2026 года). Использование этих научных результатов позволило разработать механизм оптимального распределения надёжности и эффективности работы всей системы на основе метода проектирования систем накопления энергии.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы прошли обсуждение на 4 международных и республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ. Из них 9 статей опубликованы в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 1 статья – в зарубежном журнале, индексируемом в базе данных Scopus.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка опубликованных работ, списка использованной литературы и приложения. Общий объём диссертации составляет 128 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации с научно-теоретической и практической точек зрения обоснованы актуальность проведённого научного исследования и необходимость его выполнения. Проанализирована степень изученности проблемы на современном этапе, чётко определены цель исследования и вытекающие из неё задачи. Показано соответствие темы исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, а также изложены научная новизна, полученная в рамках выполненной работы, и её практическая значимость.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Теоретические основы высокотемпературных купратных сверхпроводников»**, приведён анализ литературы по теоретическим основам сверхпроводимости в металлах и легированных медно-оксидных (купратных) соединениях, а также по основным механизмам, описывающим высокотемпературную сверхпроводимость. Проанализированы область применимости и ограничения теории Бардина–Купера–Шриффера (БКШ), разработанной для традиционных низкотемпературных металлических сверхпроводников, и показано, что наблюдаемая в купратах высокотемпературная сверхпроводимость не может быть полностью объяснена в рамках данного подхода. В рамках теоретических моделей рассмотрены характерные особенности высокотемпературных купратных сверхпроводников: слоистая кристаллическая структура, определяющая роль плоскостей CuO_2, сильные электронные корреляции, куперовские пары с *d*-симметрией, а также необычные металлические фазы. На основе приведённого в главе теоретического анализа были определены цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертационной работы, озаглавленной **«Технологии получения образцов и методы исследования»**, системно рассмотрены технологии получения купратов, являющихся объектом исследования, методы контроля качества образцов, а также методы исследования, применяемые для определения их сверхпроводящих свойств.

Метод твёрдофазной реакции для получения купратов заключается в измельчении и смешивании соответствующих оксидов или карбонатов металлов с последующей высокотемпературной кальцинацией смеси, обеспечивающей взаимную диффузию катионов. В исследовании образцы получены по этапам, представленным на рис. 1.

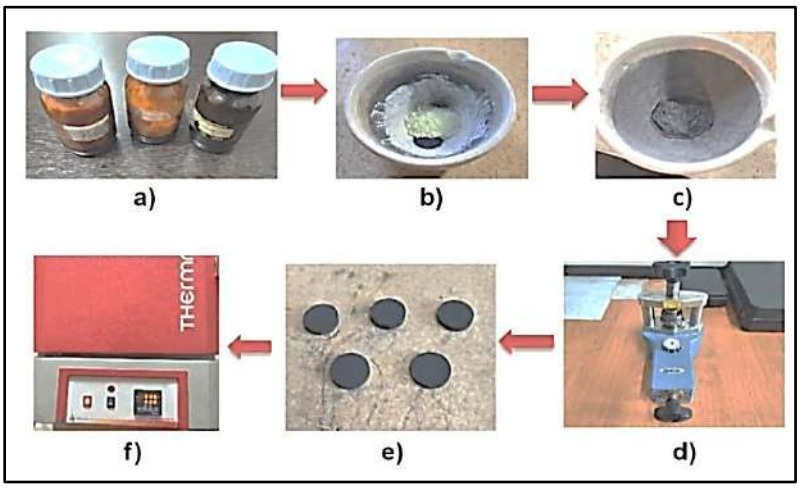


Рис. 1. Этапы метода твёрдофазной реакции: a) исходное сырьё (оксиды и карбонаты); b) высокоточное взвешивание и смешивание; c) предварительная термическая обработка (кальцинация); d) процесс прессования; e) прессованные таблетки; f) окончательная термическая обработка (спекание).

Купратные керамические образцы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) были синтезированы методом твердофазной реакции. В качестве исходных реагентов были выбраны порошки Y_2O_3, $BaCO_3$ и CuO с чистотой не менее 99,99 %, которые смешивались в массовом соотношении Y_2O_3:$BaCO_3$:CuO = 1:3,5:2,1 относительно массы оксида иттрия. Для обеспечения однородного распределения компонентов порошковая смесь тщательно измельчалась в агатовой ступке. Подготовленная смесь первоначально подвергалась кальцинации на воздухе при температуре 900 °C в течение 12 часов.

После кальцинации образец охлаждали до комнатной температуры, повторно измельчали и прессовали под давлением 150 кгс/см^2 (≈14,7 МПа) в виде цилиндрических таблеток диаметром 15 мм. Окончательное спекание прессованных образцов проводилось на воздухе при температуре 940 °C в течение 12 часов. Данная термическая обработка способствовала кристаллизации фазы Y123, улучшению межзеренной связи и уплотнению керамических образцов.

После спекания с целью улучшения кислородного упорядочения в фазе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и стабилизации сверхпроводящей орторомбической структуры был применён контролируемый многостадийный (двухстадийный) режим охлаждения. Сначала образцы охлаждали от 940 °C до 600 °C со скоростью 7–8 °C/мин. Данный этап является важным фактором для перераспределения кислорода по кристаллической решётке в высокотемпературной области, ограничения образования вторичных фаз, а также сохранения фазы Y123. На следующем этапе скорость охлаждения снижали до 1 °C/мин, и процесс проводился в среде потока кислорода. Медленное охлаждение обеспечивало

упорядоченное расположение атомов кислорода в Cu–O-цепочках, уменьшение значения δ и формирование орторомбической кристаллической симметрии, необходимой для сверхпроводимости (рис. 2).

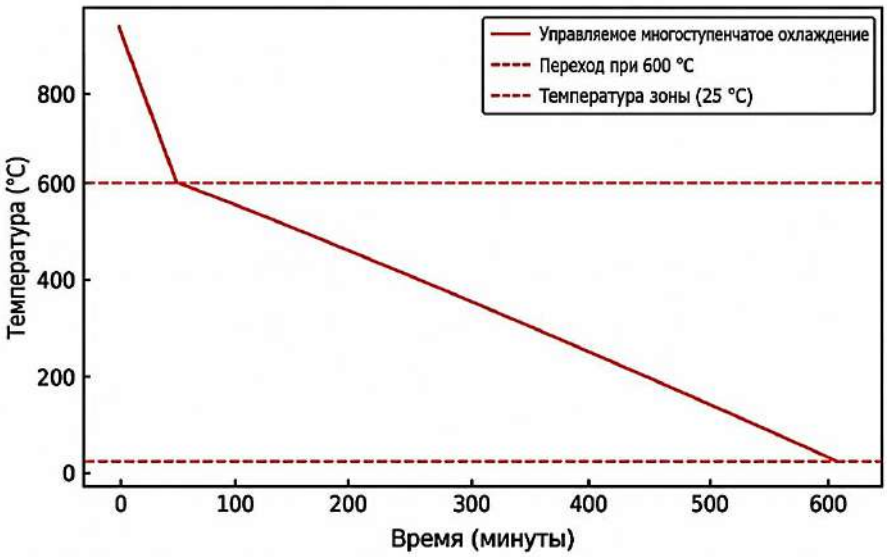


Рис. 2. Температурно-временной режим многостадийного охлаждения для обеспечения оптимального содержания кислорода при получении образца Y123.

Конечное содержание кислорода в образцах можно определить по изменению массы. При этом предполагается, что вся потеря массы связана исключительно с уменьшением содержания кислорода относительно исходного стехиометрического значения 7,00. Начальное количество вещества (число молей) образца N_i равно числу молей N_f после возникновения кислородного дефицита:

$$N_i = N_f \equiv N \quad (1)$$

Молярная масса M(Y123) соединения $YBa_2Cu_3O_7$ определяется следующим образом:

$$M(\text{Y123}) = M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + 7M(\text{O}) \quad (2)$$

где M(Y), M(Ba), M(Cu) и M(O) – молярные массы иттрия, бария, меди и кислорода соответственно. Поскольку в образцах с дефицитом кислорода на каждую формульную единицу приходится на x ($x \equiv \delta$) атомов кислорода меньше, их молярная масса M(YBCO) составляет:

$$M(\text{YBCO}) = M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + (7 - x)M(\text{O}) \quad (3)$$

Масса образца равна произведению числа молей вещества в образце на молярную массу соединения. Следовательно, начальная масса образца m_i выражается как:

$$m_i = N_i\,[M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + 7M(\text{O})] \quad (4)$$

После высокотемпературного отжига конечная масса образца с дефицитом кислорода m_f составляет:

$$m_f = N_i\,[M(\text{Y}) + 2M(\text{Ba}) + 3M(\text{Cu}) + (7 - x)M(\text{O})] \quad (5)$$

С учётом соотношения $N_i = N_f \equiv N$ для изменения массы $\Delta m = m_i - m_f$ получаем:

$$\Delta m = xNM(\text{O}) \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно потери кислорода x, получаем:

$$x = \frac{\Delta m}{NM(O)} \quad (7)$$

Неопределённость содержания кислорода в образцах с дефицитом кислорода определяется по формуле распространения погрешностей (дисперсии):

$$\delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \Delta m}\right)^2 (\delta(\Delta m))^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \mathrm{N}}\right)^2 (\delta \mathrm{N})^2} \quad (8)$$

где δx, $\delta(\Delta m)$ и δN – неопределённости потери кислорода, изменения массы и числа молей соответственно. При этом считается, что неопределённость молярной массы кислорода M(O) отсутствует.

$$N = \frac{m_i}{M(Y123)} \quad (9)$$

Неопределённость числа молей определяется следующим образом:

$$\delta N = \frac{\delta m_i}{M(Y123)} = \frac{\delta m_i}{m_i} N \quad (10)$$

Последнее равенство в выражении (10) следует из соотношения M(Y123) = m_i/N, вытекающего из (9). Частные производные, стоящие под знаком радикала в выражении (8), определяются следующим образом:

$$\frac{\partial x}{\partial \Delta m} = \frac{1}{NM(O)} \quad (11)$$

и

$$\frac{\partial x}{\partial N} = -\frac{\Delta m M(O)}{(NM(O))^2} \quad (12)$$

Квадрат неопределённости изменения массы:

$$(\delta(\Delta m))^2 = (\delta m_i)^2 + (\delta m_f)^2 \quad (13)$$

Используя выражения (10)–(13), уравнение (8) можно переписать следующим образом:

$$\delta x = \sqrt{\left(\frac{1}{NM(O)}\right)^2 \left[(\delta m_i)^2 + \left(\delta m_f\right)^2\right] + \left[\frac{\Delta m M(O)}{(NM(O))^2}\right]^2 \left(\frac{\delta m_i}{m_i} N\right)^2} =$$

$$\frac{1}{NM(O)} \sqrt{(\delta m_i)^2 + (\delta m_f)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m_i}\right)^2 (\delta m_i)^2} \quad (14)$$

Поскольку $\Delta m/m_i \sim 10^{-2}$, выполняется $(\Delta m/m_i)^2(\delta m_i)^2 \ll (\delta m_i)^2, (\delta m_f)^2$, т. е. этим членом можно пренебречь. Следовательно, неопределённость содержания кислорода определяется следующим образом:

$$\delta x \approx \frac{1}{NM(O)} \sqrt{(\delta m_i)^2 + (\delta m_f)^2} \quad (15)$$

Неопределённость измерения массы образца была принята равной:
$\delta m_i = \delta m_f = \delta m = 0{,}2$ мг, хотя аналитические весы, использованные для данных измерений, обладают чувствительностью 0,1 мг. Это было сделано для учёта колебаний цифровых показаний весов, наблюдавшихся в процессе измерений. Поэтому:

$$\delta x = \frac{\sqrt{2}\delta m}{NM(O)} \quad (16)$$

С помощью формулы (7) вычисляется кислородный дефицит x (т. е. δ) в образце $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, а с помощью формулы (16) – неопределённость его определения δx.

Для получения образцов Bi2212 также применялся метод твердофазной реакции. Исходные компоненты были подобраны в соответствии с системой Bi–Sr–Ca–Cu–O. С этой целью были взяты порошки высокой чистоты Bi_2O_3

(99,9 %), $SrCO_3$ (99,9 %), CaO (99,9 %) и CuO (99,9 %) в соответствующих соотношениях. Массы компонентов в порошковой смеси общей массой 10 г, приготовленной на основе формулы $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Массы исходных компонентов в смеси.

№	Компонент (*n* = 2)	Масса, г
1	Bi_2O_3	5,761177
2	$SrCO_3$	2,908644
3	CaO	0,346672
4	CuO	0,983507

В качестве исходных реагентов порошки Bi_2O_3, $SrCO_3$, CaO и CuO были взвешены в стехиометрическом соотношении Bi:Sr:Ca:Cu = 2:2:1:2. Для обеспечения химической и гранулометрической однородности компонентов они были тщательно измельчены в агатовой ступке и доведены до состояния гомогенной смеси. Подготовленная порошковая смесь первоначально подвергалась кальцинации при температуре 705 °C в течение 12 часов, что обеспечивало термическое разложение карбонатных компонентов, а также начало первичных твердофазных реакций в системе Bi–Sr–Ca–Cu–O. После этого образец охлаждали внутри печи в естественных условиях в течение 12 часов, повторно измельчали и гомогенизировали. С целью углубления процесса фазообразования образец подвергался повторной термической обработке при температуре 780 °C в течение 12 часов. На следующем этапе порошок снова измельчали, прессовали с помощью гидравлического пресса в форме цилиндрической таблетки диаметром 10 мм и толщиной 5 мм, после чего проводили окончательное спекание при температуре 880 °C в течение 12 часов. После спекания образец охлаждали в естественных условиях в течение 15 часов. В результате была получена купратная керамика Bi2212, предназначенная для последующего анализа структурных, раман-спектроскопических и электротранспортных свойств.

Полученные в исследовании образцы были проанализированы методом рентгеновской дифракции (XRD) с целью определения их кристаллической структуры, фазового состава, параметров решётки и кристаллографической ориентации. Для выявления колебаний кристаллической решётки (фононных мод), состояния химических связей и степени структурного порядка в образцах был применён метод рамановской спектроскопии.

Критическая температура перехода образцов Y123 и Bi2212 в сверхпроводящее состояние была определена методом измерения электрического сопротивления по четырёхконтактной схеме. В данном методе через образец с помощью двух внешних контактов пропускался электрический ток малой величины, а разность потенциалов между двумя внутренними контактами регистрировалась отдельно. Такая схема измерения позволяет устранить влияние контактных сопротивлений, сопротивления соединительных проводов, а также дополнительных падений потенциала, возникающих на границе электрод–образец, что особенно важно для получения высокоточных результатов при исследовании материалов с низким сопротивлением и материалов, переходящих в сверхпроводящее состояние. Схема измерения электрического сопротивления

четырёхконтактным методом приведена на рис. 3.

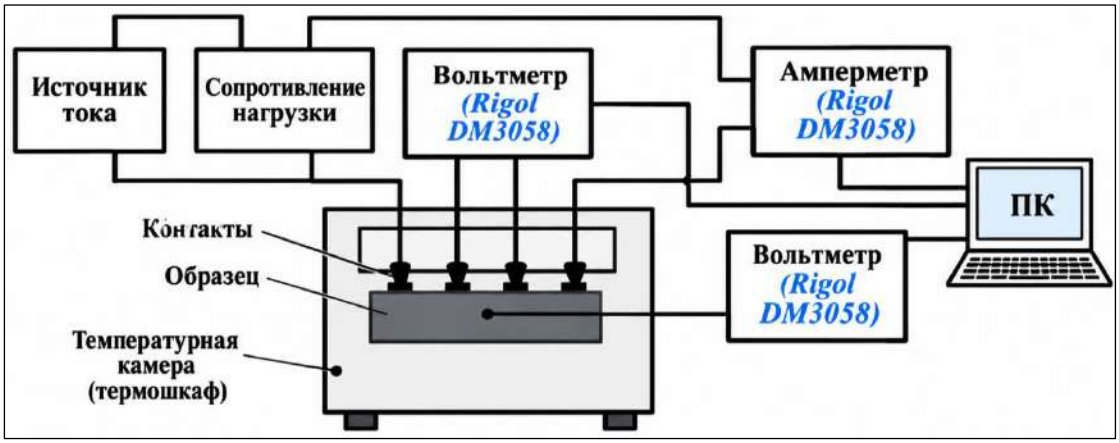


Рис. 3. Схема измерения зависимости *R*(*T*) четырёхконтактным методом.

В процессе понижения температуры на основе отношения напряжения к току была получена зависимость $R(T) = U(T)/I$, а резкое уменьшение сопротивления было принято в качестве критерия фазового перехода купратных образцов из нормального состояния в сверхпроводящее. Критическая температура определялась на основе параметров $T_{c,onset}$ (начало перехода), T_c (середина перехода) и $T_{c,zero}$ (обращение сопротивления в нуль), а по ширине перехода ΔT были проанализированы фазовая однородность образцов, степень межзеренной электрической связи, дефекты кристаллической структуры и влияние кислородной стехиометрии на транспортные свойства.

В третьей главе диссертационной работы, озаглавленной **«Структурный анализ купратов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$»**, на основе методов рентгеновской дифракции (XRD) и рамановской спектроскопии был проведён комплексный анализ кристаллической структуры, фазового состава, особенностей формирования сверхпроводящей фазы, а также локального структурного состояния купратных образцов, выбранных в качестве объекта исследования.

Рентгеновская дифрактограмма образца $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ была проанализирована с использованием метода структурного уточнения Ритвельда. Совпадение экспериментального (Y_{obs}) и рассчитанного (Y_{calc}) профилей на полученной дифрактограмме показало, что выбранная кристаллографическая модель в достаточной степени описывает основную фазу в образце. Расположение брэгговских рефлексов свидетельствует о том, что образец кристаллизуется в орторомбической кристаллической системе с пространственной группой *Pmmm*. Определённые параметры решётки составили a = 3,82067 Å, b = 3,88769 Å и c = 11,68145 Å, а объём элементарной ячейки составил V = 173,511 Å^3. Различие параметров a и b указывает на наличие орторомбической деформации в образце и упорядоченное расположение атомов кислорода в Cu–O-цепочках (рис. 4).

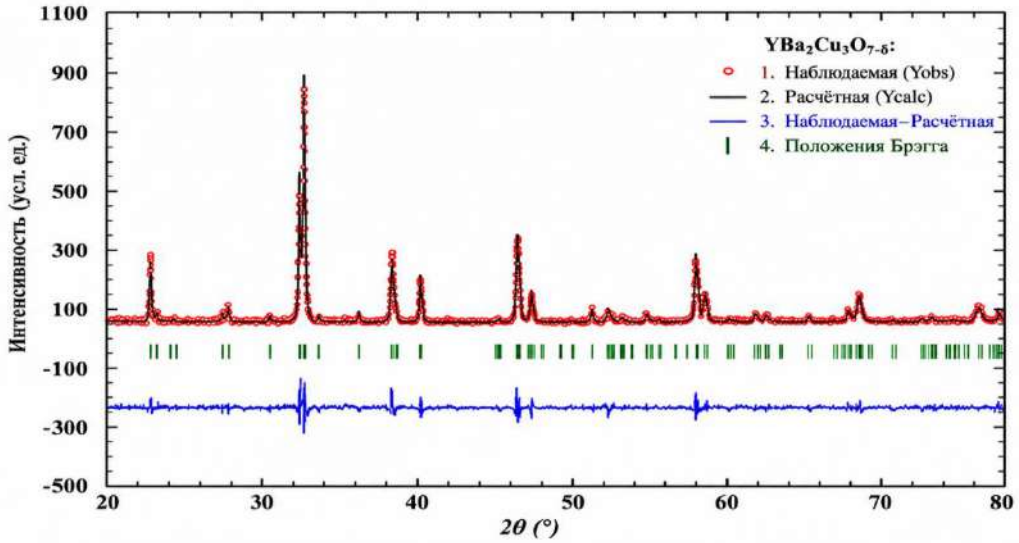


Рис. 4. Анализ рентгеновской дифрактограммы образца Y123 методом Ритвельда.

В рамках структурной модели установлено, что длины связей Cu2–O2 и Cu2–O3 в плоскостях CuO_2 составляют соответственно 1,9293 Å и 1,9609 Å, расстояние Cu1–O1 в цепочке Cu–O равно 1,9441 Å, а апикальное расстояние Cu2–O4 составляет 2,2967 Å. Рассчитанные по уточнённым координатам атомов углы связей Cu2–O2–Cu2 и Cu2–O3–Cu2 составляют соответственно ≈163,9° и ≈165,0°, что указывает на небольшую гофрировку (buckling) плоскостей CuO_2. Эти длины связей подтверждают формирование характерной для системы Y123 слоистой купратной структуры, сверхпроводящих плоскостей CuO_2 и цепочек Cu–O, выполняющих роль зарядового резервуара (рис. 5, а).

Наряду с кристаллической структурой на основе результатов рентгеновской дифракции была также построена карта фурье-электронной плотности. При этом выявление максимумов, соответствующих атомам Ba, Y, Cu и кислорода, подтвердило физическую обоснованность выбранных атомных координат (рис. 5, б).

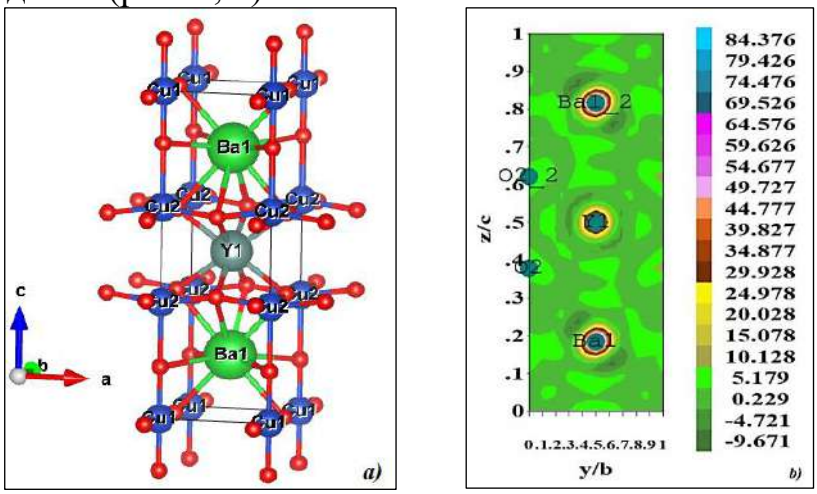


Рис. 5. *а*) Кристаллическая структура образца Y123; *б*) распределение электронной плотности (карта фурье-электронной плотности).

Построение карты фурье-электронной плотности основано на рассеянии рентгеновских лучей электронными облаками атомов кристаллической решётки. На основе структурных амплитуд, полученных из

дифракционных рефлексов, распределение электронной плотности внутри кристалла восстанавливается с помощью фурье-суммы:

$$\rho(x,y,z) = \frac{1}{V}\sum_{hkl} F(hkl)\exp[-2\pi i(hx+ky+lz)] \qquad (17)$$

Здесь:

$\rho(x,y,z)$ – электронная плотность, V – объём элементарной ячейки,

$F(hkl)$ – структурный фактор, h, k, l – индексы Миллера,

x, y, z – дробные координаты атомов.

Высота пиков, наблюдаемых на фурье-карте, зависит от рассеивающей способности атомов по отношению к рентгеновским лучам, т. е. от числа содержащихся в них электронов. В составе Y123 тяжёлые атомы формируют максимумы электронной плотности более высокого уровня по сравнению с лёгкими атомами. Поэтому наиболее высокие пики на карте соответствуют атомам Ba и Y, пики средней интенсивности – атомам Cu, а пики низкой интенсивности – атомам кислорода (рис. 6).

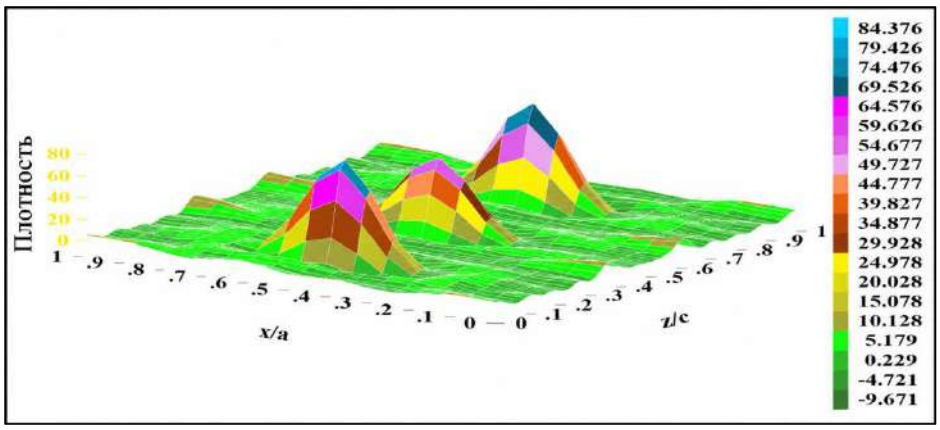


Рис. 6. Распределение фурье-электронной плотности по дробным координатам *x/a* и *z/c*.

Степень орторомбичности оценивалась следующим образом:

$$\eta = \frac{b-a}{b+a}\cdot 100\,\%, \quad \eta = \frac{3{,}88769-3{,}82067}{3{,}88769+3{,}82067}\cdot 100\,\% \approx 0{,}869\,\%$$

Данное значение указывает на наличие в образце орторомбической структуры, благоприятной для сверхпроводимости.

Таблица 2. Структурные параметры образца Y123, определённые на основе анализа Ритвельда.

№	Атом	*x*	*y*	*z*	Заселён-ность	*B*, Å^2	Заряд	Крат-ность
1	Y1(Y)	0,5	0,5	0,5	1	0,726	0	1
2	Ba1(Ba)	0,5	0,5	0,18393	1	0,979	0	2
3	Cu1(Cu)	0	0	0	1	0,908	0	1
4	Cu2(Cu)	0	0	0,35501	1	0,726	0	2
5	O1(O)	0	0,5	0	0,91	0,908	0	1
6	O2(O)	0,5	0	0,37819	1	0,816	0	2
7	O3(O)	0	0,5	0,37693	1	0,655	0	2
8	O4(O)	0	0	0,1584	1	1,005	0	2

На основе степеней заселённости (g) кислородных позиций, приведённых в таблице 2, кислородная стехиометрия образца Y123 была рассчитана путём суммирования вкладов цепочечных, плоскостных и апикальных кислородных позиций следующим образом:

$$O_{общ} = 2\cdot(O4) + 2\cdot(O3) + 2\cdot(O2) + 1\cdot(O1) = 2 + 2 + 2 + 0{,}91 = 6{,}91$$

В результате общее содержание кислорода составило $O_{общ} = 6{,}91 \pm 0{,}01$, что соответствует кислородному дефициту $\delta \approx 0{,}09$ и характеризует оптимально оксигенированную сверхпроводящую фазу.

Поскольку измеренный спектральный диапазон при **рамановском спектральном анализе** охватывал приблизительно область 173–1986 см$^{-1}$, низкочастотная область 10–300 см$^{-1}$ была оценена лишь частично; данный диапазон связан с колебаниями кристаллической решётки, коллективным движением тяжёлых ионов и низкоэнергетическими фононными модами. Основная диагностическая информация наблюдалась в среднечастотной «fingerprint/фононной» области 300–1800 см$^{-1}$. В частности, моды вблизи 301, 349, 379 и 439 см$^{-1}$ характеризуют колебания кристаллической решётки на основе Cu–O, локальное колебательное состояние плоскостей CuO_2 и планарных атомов кислорода, тогда как интенсивные рамановские моды вблизи 581 и 643 см$^{-1}$ были интерпретированы как фононные колебания, чувствительные к кислородной подрешётке, цепочкам Cu–O и окружению апикального кислорода. Слабые полосы вблизи 756 и 902 см$^{-1}$, а также широкие спектральные компоненты в области около 1212 и 1584 см$^{-1}$, вероятно, связаны не с основными фононами первого порядка, а с дефектно-активированными, комбинационными или высокопорядковыми процессами рамановского рассеяния (рис. 7).

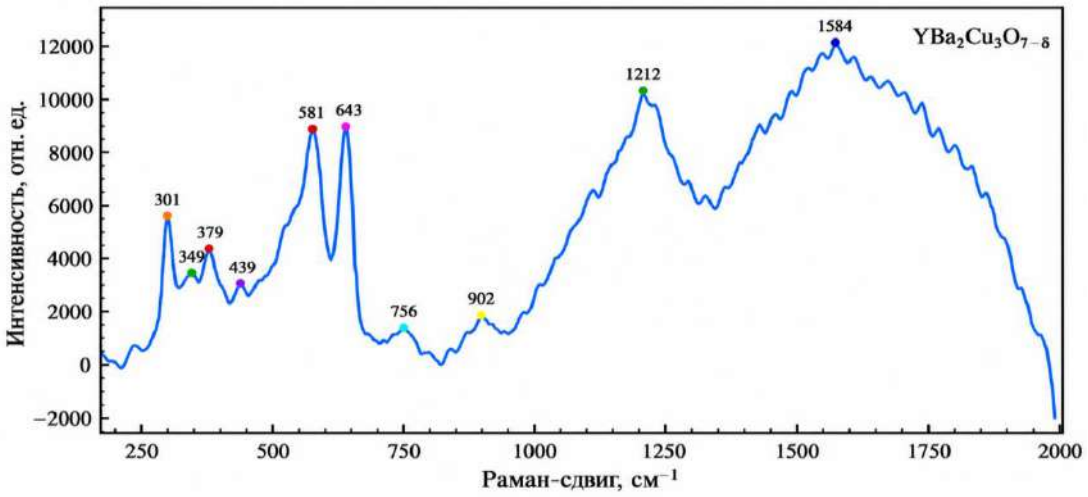


Рис. 7. Рамановский спектр купрата Y123 (t = 21 °C).

Купрат $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212) обладает сильно анизотропной слоистой структурой, и на его дифрактограмме при малых углах наблюдаются характерные рефлексы (00l) (l = 2, 4, 6, 8, …). Основной максимум (002) расположен при $2\theta \approx 5{,}7°$, что соответствует $c \approx 30{,}8$ Å. Такой большой параметр c отражает слоистую природу Bi2212 и большое межслоевое расстояние (рис. 8).

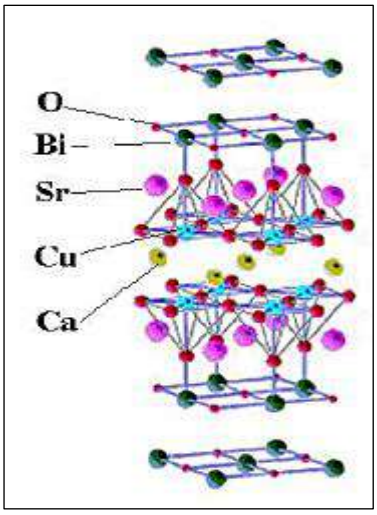


Рис. 8. Кристаллическая структура купрата Bi2212 (тетрагональная модель *I*4/*mmm*).

Кристаллическая структура Bi2212 обычно описывается в рамках тетрагональной пространственной группы *I*4/*mmm* (усреднённая структура) или более низкосимметричной орторомбической пространственной группы *Fmmm*. В структуре на каждую формульную единицу приходятся две плоскости CuO_2, разделённые слоем Ca.

Фаза Bi2212 стабильна в узком интервале температур и составов; её можно идентифицировать по характерным рефлексам (00*l*), соответствующим $c \approx 30{,}8$ Å. Фазовая чистота и стабильность контролируются условиями синтеза и соотношениями компонентов.

Пик, наблюдаемый в рамановском спектре при 552,46 см$^{-1}$, соответствует валентным колебаниям связи Bi–O. Пик при 610,55 см$^{-1}$ отражает валентные колебания связи Cu–O, а пик, зафиксированный при 403,83 см$^{-1}$, соответствует колебаниям связи Ca–O. Это указывает на наличие в образце химических связей, характерных для фазы Bi2212 (рис. 9).

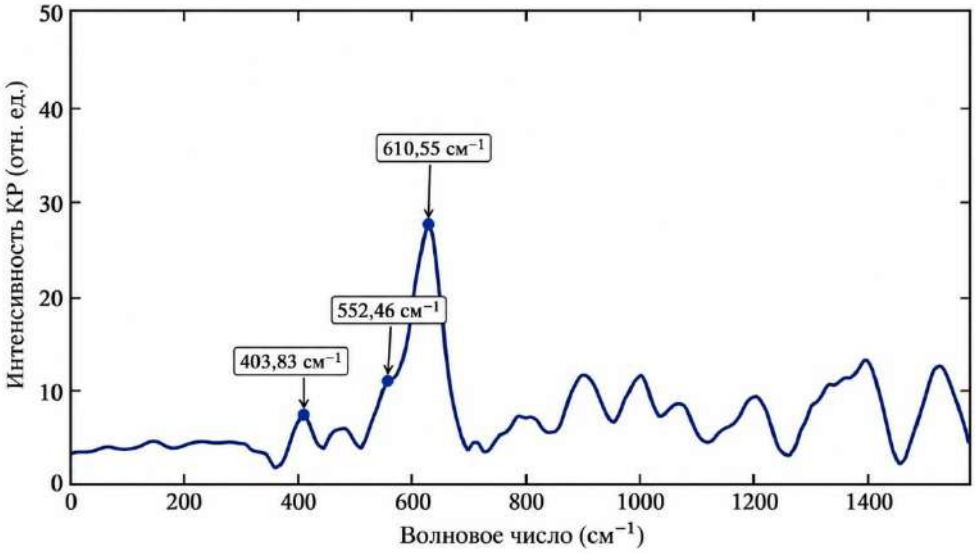


Рис. 9. Рамановский спектр образца Bi2212.

Систематическое сравнение кристаллических структур купратов Y123 и Bi2212 важно для понимания различий в их сверхпроводящих свойствах (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение структурных параметров купратов Y123 и Bi2212.

Параметр	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$
Пространственная группа	*Pmmm* (орторомбическая)	*Fmmm* (псевдотетрагональная)
a (Å)	3,82067	5,414
b (Å)	3,88769	5,418
c (Å)	11,68145	30,78
Объём элементарной ячейки (Å^3)	173,511	902,1
Число плоскостей CuO_2	2 (двухслойная структура)	2 (двухслойная структура)
Расстояние между двойными слоями CuO_2 (Å)	11,68	15,39
Cu–O (в плоскости) (Å)	1,93–1,96	1,90–1,92
Cu–O (апикальная) (Å)	2,30	2,40
$T_{c,max}$ (K)	91–95,5	90–95
ρ_c/ρ_{ab}	~50	10^4–10^5

Несмотря на близость критических температур этих двух купратов, сверхпроводимость в них определяется различными структурными факторами: в Y123 основную роль играют упорядочение кислорода в Cu–O-цепочках и орторомбическая деформация, тогда как в Bi2212 определяющее значение имеют слоистая (псевдотетрагональная) структура с большим параметром *c*, резервуарные слои Bi–O и выраженный двумерный характер плоскостей CuO_2.

В четвёртой главе диссертационной работы, озаглавленной **«Зависимость сверхпроводящих свойств купратов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ от кристаллической структуры и технологии получения»**, на основе экспериментальных результатов проанализированы переход образцов в сверхпроводящее состояние, их электрические свойства и факторы, влияющие на них, а также установлена взаимная корреляция параметров.

Сопротивление, измеренное четырёхконтактным методом, начинает резко уменьшаться примерно при 97 K ($T_{c,onset}$). Значение сопротивления становится равным нулю приблизительно при 94 K ($T_{c,zero}$), а средняя точка перехода наблюдается при T_c = 95,5 K. Узкий интервал перехода, составляющий приблизительно ΔT = 3 K, указывает на хорошую композиционную однородность образца. Кроме того, низкое сопротивление в нормальном состоянии при температурах немного выше перехода подтверждает сильную межзеренную связь и высокий уровень микроструктурной упорядоченности (рис. 10).

Установленное для образца Y123 значение $T_c \approx$ 95,5 K на 2–3 K превышает широко приводимые в литературе значения 91–93 K. Поэтому с целью выявления технологических факторов, оказывающих определяющее влияние на критическую температуру, был спланирован синтез дополнительной серии образцов следующим образом.

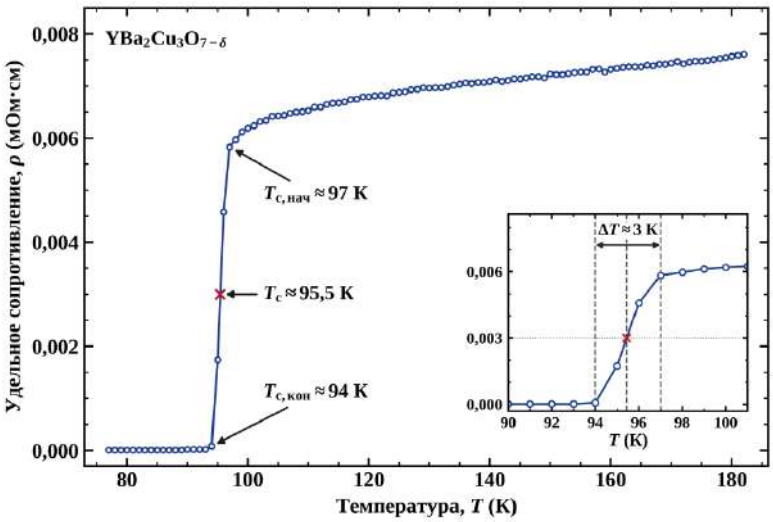


Рис. 10. Температурная зависимость электрического сопротивления образца Y123 (T_c = 95,5 K, ΔT = 3 K).

Для изучения влияния параметров синтеза на критическую температуру T_c для каждого параметра были выбраны по три уровня (значения) (табл. 4).

Таблица 4. Выбранные уровни параметров синтеза Y123.

№	τ_1 (ч)	T_{cal} (°C)	τ_2 (ч)	T_{sin} (°C)	P (кгс/см^2)	τ_3 (ч)
1	12	880	12	900	100	9,5
2	18	900	18	920	150	10,5
3	24	920	24	940	200	11,5

Здесь:

τ_1 – время предварительного нагрева (кальцинации);

T_{cal} – температура предварительного нагрева (кальцинации);

τ_2 – время спекания;

T_{sin} – температура спекания;

P – давление прессования;

τ_3 – время контролируемого охлаждения после спекания.

С целью полного изучения влияния параметров с помощью программы MATLAB был составлен полный факторный план, включающий 3^6 = 729 возможных комбинаций параметров синтеза. Поскольку проведение такого количества экспериментов требует значительных временных и материальных затрат, для сокращения числа экспериментов на основе ортогональной матрицы Тагути L18 были выбраны 18 комбинаций. Данные образцы были синтезированы в лабораторных условиях, после чего были измерены значения T_c.

В 18 экспериментах, выбранных по методу Тагути, образцы были получены поэтапно методом твердофазной реакции. Параметры синтеза и измеренные значения T_c для каждого эксперимента приведены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры синтеза по ортогональной матрице Тагути L18 и измеренные значения T_c и ΔT.

№	τ_1 (ч)	T_{cal} (°C)	τ_2 (ч)	T_{sin} (°C)	P (кгс/см^2)	τ_3 (ч)	T_c (K)	ΔT (K)
1	12	880	12	900	100	9,5	95,3	9
2	18	900	18	920	150	9,5	93,1	5
3	24	920	24	940	200	10,5	88	9
4	12	880	18	920	200	9,5	90,5	8
5	18	900	24	940	100	10,5	92,3	7
6	24	920	12	900	150	9,5	92,2	5
7	12	900	12	940	150	9,5	92,4	4
8	18	920	18	900	200	11,5	92	6
9	24	880	24	920	100	9,5	93,2	2
10	12	920	24	920	150	9,5	91,1	5
11	18	880	12	940	200	9,5	92,3	4
12	24	900	18	900	100	11,5	91,2	5
13	12	900	24	900	200	10,5	93	4
14	18	920	12	920	100	11,5	92,1	4
15	24	880	18	940	150	11,5	87,8	5
16	12	920	18	940	100	11,5	89	7
17	18	880	24	900	150	10,5	95,5	3
18	24	900	12	920	200	11,5	92,5	3

На основе полученных экспериментальных результатов была построена регрессионная модель, отражающая влияние факторов синтеза на T_c. Поскольку результаты не полностью описывались простой линейной моделью, была выбрана эмпирическая регрессионная модель, включающая линейные и квадратичные основные эффекты. Итоговая модель в натуральных единицах выражается следующим образом:

$$T_c = 91{,}304545 - 0{,}088889(\tau_1 - 18) - 0{,}042500(T_{cal} - 900) - 0{,}072500(T_{sin} - 920) - 0{,}047790(\tau_1 - 18)^2 - 0{,}002551(T_{cal} - 900)^2 + 0{,}062942(\tau_2 - 18)^2 + 1{,}122727(\tau_3 - 10{,}5)^2 \quad (18)$$

где T_c – критическая температура, K; τ_1, τ_2, τ_3 – ч; T_{cal} и T_{sin} – °C. Давление прессования P не было включено в итоговое уравнение регрессии, поскольку в исследованном диапазоне его независимое статистическое влияние на T_c оказалось очень слабым по сравнению с другими факторами.

Таблица 6. Точность регрессионной модели и статистические показатели.

Показатель	Значение
Число экспериментов	$n = 18$
Коэффициент детерминации	$R^2 = 0{,}911031$
Скорректированный коэффициент детерминации	$R^2_{adj} = 0{,}848753$
Среднеквадратическая ошибка (RMSE)	0,6024 K
Стандартная ошибка остатков	0,8082 K
Среднеквадратическая ошибка перекрёстной проверки с исключением по одному (LOOCV)	1,0975 K
Уровень статистической значимости модели (p-значение)	$1{,}62 \cdot 10^{-4}$
Максимальный абсолютный остаток	≈ 1,08 K

Значение $R^2 \approx 0{,}91$ показывает, что модель объясняет бóльшую часть дисперсии T_c в 18 экспериментах. Ошибка LOOCV около 1,10 K свидетельствует о том, что модель не переобучена на экспериментальных точках (отсутствует overfitting) и обладает прогностической способностью.

Доли относительного влияния параметров синтеза на критическую температуру были определены в нормированном виде на основе скорректированного дисперсионного анализа (adjusted ANOVA) и метода оценки относительной значимости (relative importance). В результате было установлено, что основным фактором, управляющим T_c, является температура спекания (рис. 11).

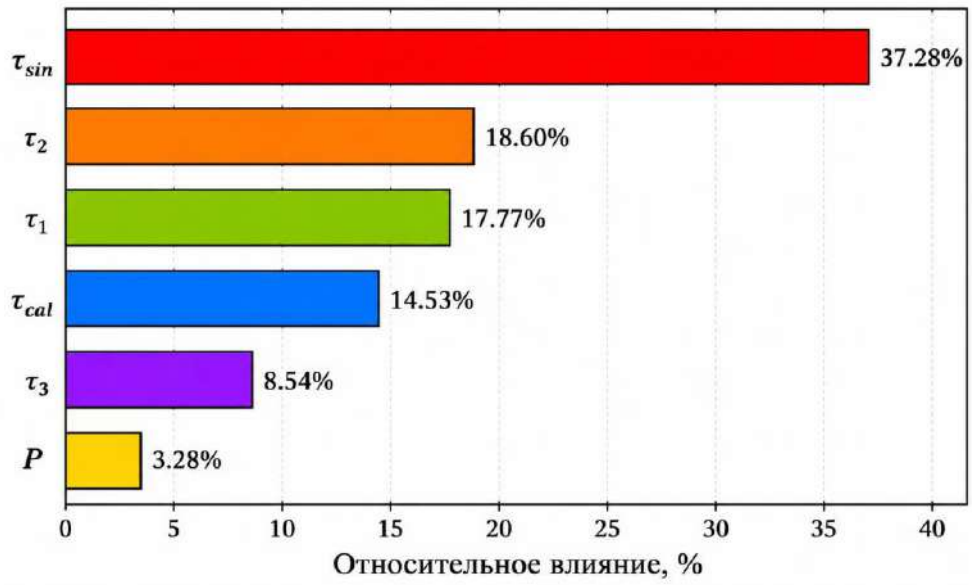


Рис. 11. Относительное влияние параметров получения на критическую температуру образца Y123.

Результаты анализа показали, что наиболее сильное влияние на T_c оказывает температура спекания T_{sin}: повышение T_{sin} с 900 °C до 940 °C приводит к снижению среднего значения T_c с 93,2 K до 90,3 K. Это объясняется нарушением кислородной стехиометрии, ослаблением упорядочения в Cu–O-цепочках, образованием вторичных фаз или ухудшением межзеренной связи при высокотемпературном спекании в системе Y123. Следовательно, для получения высокой T_c чрезмерное повышение температуры спекания нецелесообразно.

Оценка относительного влияния показала, что влияние параметров синтеза на критическую температуру убывает в следующем порядке:

$$T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P.$$

График основных эффектов по средним значениям T_c, полученным при низком, среднем и высоком уровнях каждого параметра, приведён на рис. 12.

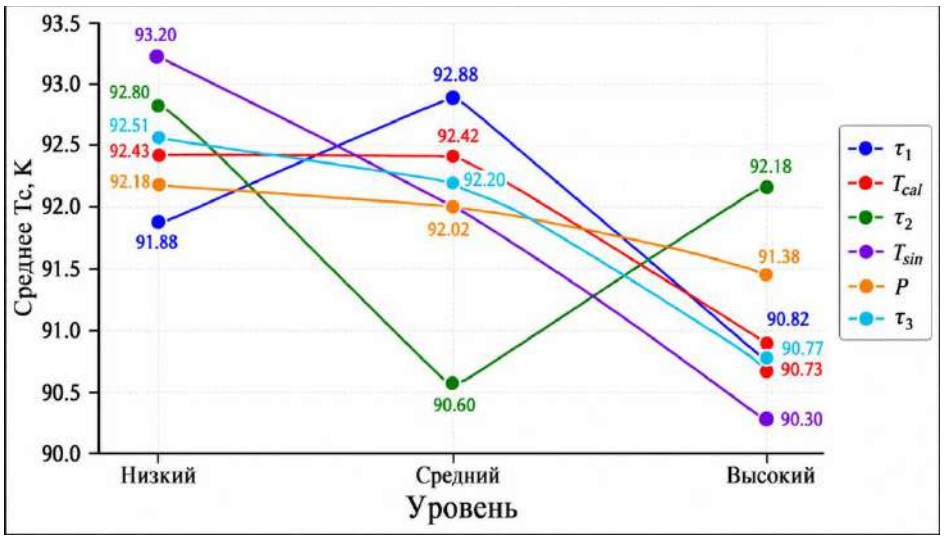


Рис. 12. График основных эффектов по средним значениям T_c при различных уровнях параметров синтеза.

$\boldsymbol{T_{sin}}$ – при 900 °C среднее значение T_c максимально, а при 940 °C наблюдается заметное снижение. Это объясняется нарушением кислородной стехиометрии, ослаблением упорядочения в Cu–O-цепочках, образованием вторичных фаз или ухудшением межзеренных контактов при высокой температуре;

$\boldsymbol{\tau_2}$ – зависимость нелинейная: при 18-часовом режиме T_c ниже, а при 12- и 24-часовом режимах – выше. Это указывает на сложный (нелинейный) характер кинетики фазообразования и оксигенации;

$\boldsymbol{\tau_1}$ – максимум наблюдается около 18 ч. Слишком короткое время может быть недостаточным для фазообразования, а слишком длительное – приводить к росту частиц или снижению эффективности последующей оксигенации;

$\boldsymbol{T_{cal}}$ – благоприятен интервал 880–900 °C, тогда как 920 °C снижает T_c. Высокотемпературная кальцинация может отрицательно влиять на реакционную способность порошка и локальную стехиометрию;

$\boldsymbol{\tau_3}$ – влияние имеется, однако его статистическая достоверность ниже, чем у T_{sin}, τ_2 и τ_1. Поэтому его целесообразно рассматривать как вспомогательный технологический параметр;

$\boldsymbol{P}$ – непосредственное влияние давления прессования на T_c наименьшее. Однако оно может косвенно влиять на плотность, межзеренные контакты, механическую прочность и ширину перехода ΔT.

В образце $YBa_2Cu_3O_{6,91}$ с оптимальным содержанием кислорода высокая критическая температура сверхпроводимости зависит не только от макроскопических параметров кристаллической решётки, но и от локальной геометрии связей между плоскостями CuO_2 и слоями зарядового резервуара. Длина апикальной связи Cu2–O4, равная 2,2967 Å, упорядоченное состояние Cu–O-цепочек и оптимальные значения углов связей Cu–O–Cu (≈164–165°) усиливают эффективную гибридизацию орбиталей Cu 3*d* и O 2*p*, перенос носителей заряда в плоскости CuO_2 и их подвижность вдоль плоскостей. В результате такого структурного состояния сформировалась стабильная

сверхпроводящая фаза с T_c = 95,5 K и узким интервалом перехода ΔT = 3 K.

Полученные результаты показывают, что длина апикальной связи Cu–O и угол Cu–O–Cu могут использоваться в качестве структурных индикаторов, характеризующих качество сверхпроводимости купратов Y123. Кроме того, обосновано, что целенаправленное управление этими параметрами посредством содержания кислорода и режима термической обработки является эффективным научно-технологическим путём повышения критической температуры и обеспечения стабильности сверхпроводящей фазы в материалах Y123.

Наблюдение эффекта Мейсснера и магнитной левитации

С целью качественного подтверждения сверхпроводящих свойств синтезированного образца Y123 его мейсснеровский отклик был исследован с помощью эксперимента по магнитной левитации. В данном опыте использовались 8 неодимовых (NdFeB) постоянных магнитов марки N38 размером 10×10×10 мм. Охлаждённый в жидком азоте образец сверхпроводника в магнитном поле этих магнитов, как показано на рис. 13, находился в устойчивом подвешенном состоянии (в состоянии левитации), что наглядно демонстрирует сильное вытеснение магнитного потока из образца, характерное для эффекта Мейсснера при температурах ниже критической (в сверхпроводниках II рода вклад в устойчивость левитации вносит также пиннинг вихрей магнитного потока).

Рис. 13. Устойчивая левитация образца Y123, охлаждённого в жидком азоте (77 K), над магнитами NdFeB (проявление эффекта Мейсснера).

Кристаллическая структура и сверхпроводимость купрата $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212).

Электротранспортные свойства

Электрическое сопротивление образца Bi2212 измерялось по четырёхконтактной схеме, приведённой на рис. 3. Образец охлаждали до температуры кипения жидкого азота (T = 77 K) и пропускали через него постоянный ток величиной 5 мА. Зависимость сопротивления от температуры определялась путём измерения разности потенциалов с помощью мультиметров Rigol DM3068 и Rigol DM3058E.

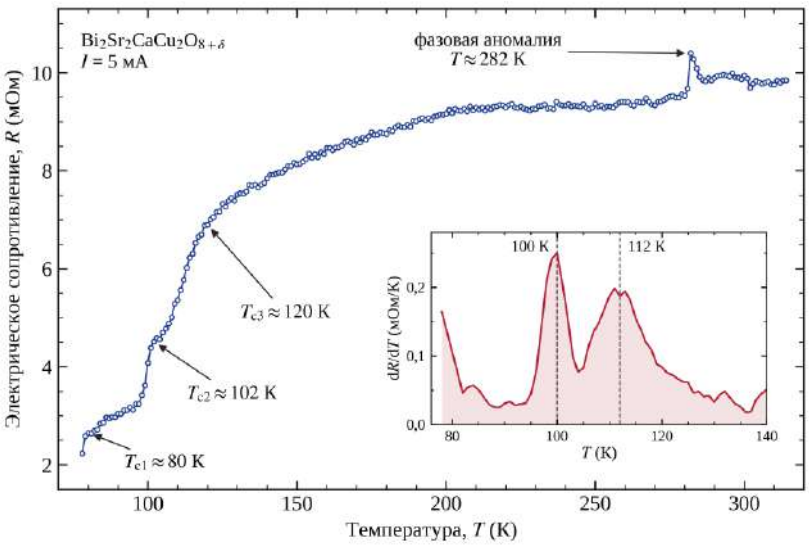


Рис. 14. Температурная зависимость электрического сопротивления сверхпроводящего образца Bi2212.

Температура регистрировалась с помощью хромель-копелевой термопары. Как видно из графика, с повышением температуры в изменении сопротивления наблюдается несколько скачкообразных переходов. Соответствующие этим переходам температуры составили T_{c1} = 80 K, T_{c2} = 102 K и T_{c3} = 120 K. При температуре около T = 284 K на графике появляется отчётливый пик, что свидетельствует о фазовом изменении (аномалии) в образце.

На основе анализа научной литературы и результатов проведённых нами исследований установлено, что технология получения купратов на основе висмута является сложным процессом, и правильный выбор температуры на стадиях кальцинации и спекания имеет исключительно важное значение. Для получения однофазного сверхпроводника из купратов на основе висмута необходимо проводить спекание образца при температуре, очень близкой к температуре его частичного плавления.

Поскольку измерения проводились начиная с температуры кипения жидкого азота (77 K), состояние с нулевым сопротивлением не было зарегистрировано. Согласно анализу научной литературы, для таких образцов критическая температура, соответствующая состоянию R = 0, составляет $T_c \leq 75$ K. В приготовленном нами образце с повышением температуры наблюдалось последовательное скачкообразное увеличение сопротивления. Вместе с тем в образце был зафиксирован фазовый переход при температуре, близкой к комнатной, $T \approx 284$ K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе систематических экспериментов определены эффективные температурно-временные режимы, обеспечивающие стабильное формирование сверхпроводящей фазы в купратах Y123 и Bi2212: для Y123 – кальцинация при 880–920 °C в течение 12–18 ч и спекание при 900–940 °C в течение 12–24 ч; для Bi2212 – соответственно при 760–840 °C в течение 18–

24 ч и при 830–850 °C в течение 12–24 ч. Многочисленными экспериментами обосновано, что эти термические режимы стабилизируют фазовый состав, а также обеспечивают повышение и воспроизводимость значения критической температуры T_c.

2. Установлено эффективное влияние многостадийного режима охлаждения при синтезе образцов Y123 на формирование сверхпроводящей фазы и упорядочение атомов кислорода в кристаллической решётке. Экспериментально подтверждено, что ступенчатое охлаждение активирует диффузию кислорода, усиливает перераспределение кислородных вакансий и упорядочение Cu–O-цепочек.

3. Рентгенодифракционные данные полученных образцов уточнены методом Ритвельда; определены фазовый состав, симметрия кристаллической решётки, а также параметры *a*, *b*, *c* и объём орторомбической элементарной ячейки. С помощью программы VESTA создана пространственная модель кристаллической структуры, визуализированы координационное расположение атомов в решётке, длины связей Cu–O, углы связей Cu–O–Cu (≈164–165°) и структурное состояние слоёв Cu–O. На основе рентгенодифракционных данных восстановлена карта фурье-электронной плотности; показаны правильность выбора атомных позиций и связь распределения электронной плотности со связями медь–кислород и степенью упорядочения кислорода.

4. Экспериментально определено влияние параметров синтеза и термической обработки купратного высокотемпературного сверхпроводника Y123 на критическую температуру T_c. Количественная связь между технологическими факторами и T_c выражена на основе регрессионного анализа. В результате разработана эмпирическая регрессионная модель с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}91$, позволяющая заранее оценивать критическую температуру образцов.

5. Технологические факторы, влияющие на критическую температуру T_c при синтезе купратных высокотемпературных сверхпроводников Y123, оценены методом Тагути, и экспериментально установлено, что относительная степень их влияния убывает в последовательности $T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P$. Результаты показали приоритетное значение температуры спекания и времени изотермической выдержки для фазообразования, кислородной стехиометрии и значения T_c.

6. Экспериментально наблюдалось проявление эффекта Мейсснера в синтезированном образце Y123, и качество его сверхпроводимости оценено на основе критериев магнитного отклика. Полученные результаты показали, что сверхпроводящее состояние подтверждается не только обращением электрического сопротивления в нуль, но и вытеснением магнитного потока из образца при температурах ниже критической.

SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT BUKHARA STATE UNIVERSITY

BUKHARA STATE UNIVERSITY

TURAYEV OZODJON GAYRAT OGLI

CRYSTAL STRUCTURE AND SUPERCONDUCTIVITY OF $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) AND $Bi_2Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_\delta$ (Bi2212) CUPRATES

01.04.07 – Condensed matter physics

DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences

Bukhara – 2026

The topic of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation in physical and mathematical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2025.1.PhD/FM1249.

The dissertation was carried out at Bukhara State University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is posted on the website of the Scientific Council (www.buxdu.uz) and on the "Ziyonet" information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:	**Turayev Akmal Atayevich** Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Astanov Salix Husenovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Kurbanov Ulugbek Tajibayevich Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Senior Researcher
Leading organization:	**National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek**

The defense of the dissertation will be held on "17" october 2026, at 10^{00} at the meeting of the Scientific Council No. PhD.03/2025.27.12.FM.08.06 at Bukhara State University (Address: 200117, BSU, M. Iqbol street 11, Bukhara city, tel. (+99865) 221-30-46; fax (+99865) 221-29-06; e-mail: buxdu_rektor@buxdu.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of Bukhara State University (registered under No. 0/1034) (Address: 200117, BSU, M. Iqbol street 11, Bukhara city, tel. (+99865) 221-30-46).

The abstract of the dissertation was distributed on " 5 " october 2026.

(Registry record No. 2 dated " 5 " october 2026.)

M.Z. Sharipov
Chairman of the Scientific Council on Awarding Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor

Sh.Sh. Fayziyev
Scientific Secretary of the Scientific Council on Awarding Scientific Degrees, Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Sh.A. Rahimov
Chairman of the Scientific Seminar under the Scientific Council on Awarding Scientific Degrees, Doctor of Sciences (DSc) in Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation)

The purpose of the research is to determine the influence of the technological parameters employed in the synthesis of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ and $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ high-temperature cuprate superconductors on their crystal structure and superconducting properties (critical temperature).

Research objectives. The objectives of the research are as follows:

- to determine, through experimental investigations, the temperature and time regimes affecting phase formation, crystal structure development, and stabilization of oxygen stoichiometry during the synthesis of Y123 and Bi2212 cuprate high-temperature superconductors;
- to determine the role of multistage cooling technology in the formation of the superconducting phase during the synthesis of Y123-based cuprate high-temperature superconductor samples, and to investigate the effects of each thermal stage of the cooling process on the diffusion of oxygen atoms within the crystal lattice, their ordering in Cu–O chains, the redistribution of oxygen vacancies, and the transition from the tetragonal to the orthorhombic phase;
- to investigate the crystal structure of the synthesized samples by means of X-ray diffraction analysis and, through the intensity, shift, and broadening of diffraction maxima, to determine the phase composition, crystal lattice symmetry (orthorhombic or tetragonal structural state), and the presence of structural defects;
- to experimentally determine the effects of synthesis and heat-treatment parameters on the critical temperature T_c and the formation of the superconducting state, as well as to develop a regression-based empirical formula describing the dependence of T_c on technological and structural factors;
- to experimentally determine, on the basis of the Taguchi design-of-experiments method and regression analysis, the relative contributions of the principal technological factors governing the synthesis of Y123-based cuprate high-temperature superconductors – calcination and sintering temperatures, isothermal holding times, pressing pressure, and post-sintering cooling time – to the T_c value;
- to experimentally verify the formation of a genuine superconducting phase in the synthesized cuprate high-temperature superconducting samples through observation of the Meissner effect.

Object of the research. The objects of the present study are $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ and $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ cuprates.

Subject of the research. The subject of the research comprises the crystal structure of Y123 and Bi2212 cuprate high-temperature superconductors synthesized by the solid-state reaction method, the oxygen-content-dependent variation of lattice parameters, structural ordering in CuO_2 planes and Cu–O chains, Raman spectra and X-ray diffraction results, as well as the regularities of the superconducting transition and of the formation of the critical temperature and electrophysical properties established from the temperature dependence of electrical resistance.

Research methods. The solid-state reaction method was employed for the synthesis of cuprates; X-ray diffraction (with Rietveld analysis), Raman spectroscopy, the four-probe electrical resistance method, and a magnetic levitation experiment were used to investigate the properties of the samples; the Taguchi design-of-experiments method and regression analysis were used to analyze the experimental results.

Scientific novelty of the research is as follows:

- by purposefully modifying the main technological parameters of solid-state synthesis – calcination and sintering regimes, oxygen atmosphere, and cooling rate – a high-temperature superconducting $YBa_2Cu_3O_{6.91}$ sample with a critical temperature of T_c = 95.5 K, exceeding the values of 91–93 K reported in the literature, and a superconducting transition width of ΔT = 3 K was obtained;
- the quantitative relationship between the technological parameters of Y123 cuprate synthesis and the critical temperature T_c was established by regression analysis, and an empirical regression model with a coefficient of determination of R^2 = 0.91, capable of predicting the T_c value with high reliability, was developed;
- the effects of the principal technological factors of Y123 cuprate synthesis – calcination and sintering temperatures, isothermal holding times, pressing pressure, and post-sintering cooling time – on the critical temperature T_c were comprehensively analyzed using the Taguchi design-of-experiments method, and the relative contributions of these parameters to the formation of T_c were experimentally established in the following order: $T_{sin} > \tau_2 > \tau_1 > T_{cal} > \tau_3 > P$;
- for Y123 samples with an optimal oxygen stoichiometry, the apical Cu2–O4 bond length (2.297 Å) and the Cu–O–Cu bond angles in the CuO_2 planes (≈164–165°) were experimentally determined; the relationships between these local structural parameters and the superconducting transition temperature T_c were generalized, and their role in the formation of T_c was scientifically substantiated;
- investigation of the temperature dependence of the electrical resistance of the Bi2212 sample revealed multistage superconducting–normal state transitions occurring at 80, 102, and 120 K, as well as an additional phase anomaly observed near 284 K, thereby substantiating the complex (multiphase) composition of the sample.

Practical results of the research are as follows:

- the temperature–time regimes, oxygen atmosphere, and cooling conditions for synthesizing yttrium-based Y123 cuprates by the solid-state reaction method were optimized, and a technology for obtaining samples with high phase purity and stable superconducting properties was developed;
- based on the transitions identified in the Bi2212 sample at 80, 102, and 120 K and the anomaly observed near 284 K, criteria were proposed for controlling the phase composition and superconducting quality of the material through the temperature dependence of electrical resistance, and synthesis and heat-treatment regimes for obtaining samples with high critical temperatures were developed;
- a regression-based empirical formula was developed for Y123 samples, which describes the contribution of synthesis parameters affecting crystal lattice

formation to the critical temperature T_c and enables highly accurate prediction of the critical temperature.

Reliability of the research results is ensured by the use of well-established modern experimental methods of condensed matter physics and materials science, including X-ray diffraction analysis for determining the phase composition and crystal structure of Y123 and Bi2212 samples, structural analysis of the apical Cu–O bond length and the Cu–O–Cu bond angles, evaluation of the critical temperature through the temperature dependence of electrical resistance, as well as by the mutual consistency of the relationships between oxygen content, structural parameters, and superconducting properties, and the agreement between calculated and experimental results.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results lies in the experimental substantiation that achieving a high critical temperature in Y123 cuprate depends directly on the technological parameters of the synthesis process, the oxygen content, and the crystal structure characteristics.

The practical significance of the research results is determined by the scientific substantiation of the optimal technological parameters for obtaining Y123 and Bi2212 high-temperature superconducting samples; these results serve as a scientific basis for the large-scale production of these materials with the required structural and electrophysical properties and for their application in power engineering, electrical engineering, and cryogenic devices.

Implementation of the research results. Based on the results obtained concerning the crystal structure and superconductivity of Y123 and Bi2212 high-temperature superconducting samples:

- the results obtained on the magnetic properties of Y123 samples and the Meissner effect observed therein were used in the scientific project No. FWES-2024-0001 “Search, Synthesis, and Investigation of New Functional Magnetic Materials and Hybrid Structures”, carried out in 2021–2030 at the L.V. Kirensky Institute of Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Reference No. 03-125 dated March 31, 2026, issued by the Institute of Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences). The application of these scientific results made it possible to identify new materials with promising magnetic properties, purposefully control their structural and functional parameters, and synthesize materials with enhanced magnetic characteristics;
- the regression-based empirical formula developed for Y123 samples, which describes the contribution of synthesis parameters affecting crystal lattice formation to the critical temperature T_c and predicts the critical temperature with high accuracy, was used in obtaining scientific results within the framework of the joint fundamental research project No. MUK-2021-40 “Research and Application of an Intelligent (AI) Renewable Energy Grid System Based on Big Data”, carried out during 2022–2023 by the Andijan Machine-Building Institute (currently Andijan State Technical Institute) in collaboration with the North China University of Technology, People’s Republic of China (Reference No. 01-03-404 dated January 29, 2026, issued by Andijan State Technical Institute). The application of

these scientific results enabled the development of a mechanism for the optimal distribution of overall system reliability and operational efficiency based on an energy storage system design approach.

Approbation of the research results. The main results of the dissertation research were presented and discussed at four international and national scientific conferences.

Publication of the research results. A total of 20 scientific works on the dissertation topic have been published, including 9 articles in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations, one of which was published in a foreign journal indexed in the Scopus database.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of published works, a list of references, and an appendix. The total volume of the dissertation is 128 pages.

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

I bo'lim (часть I; Part I)

1. Ozodjon Turayev, Akmal Turayev, Davron Dzhuraev, Abdullo Ahadov, Enhanced phase purity and superconducting performance of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ceramics synthesized by solid-state route with multi-stage cooling // Ceramics International – Elsevier Ltd. (United Kingdom) 2026. Vol. 52. 7761-7767 p. (01.00.00; № 3 Scopus; IF-6, Q1).

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884225065253?via%3Dihub

2. Джураев, Д., Тураев, А. & Тураев, О. (2026). Оптимизация синтеза сверхпроводящих YBCO образцов с применением алгоритма случайного леса и метода Тагучи. // Узбекский физический журнал – Ташкент (Узбекистан) – 2026 vol. 27 (4). ст 611 (01.00.00. № 5) https://ufj.uz/index.php/ufj/article/view/611

3. O.G'. To'rayev, YCBO – 123 namumaning kristall panjarasidagi atomlar bog'lanishini Raman spektrometrik tahlili // NamDU ilmiy axborotnamasi Namangan (O'zbekiston). 1/2025, 28-31 b. (01.00.00. № 14). https://journal.namdu.uz/archive/2025-issue-1/maqola-35317-1736423798

4. Ozodjon Turayev, X-ray Structural Analysis and Superconducting Properties of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) Synthesized via Solid-State Reaction // International Journal of Science and Technology. Farg'ona (O'zbekiston) - 2025, Vol. 02, Is 08. p 138-142 (01.00.00 (16) CiteFactor). https://science-technology.uz/index.php/journal/article/view/464

5. A.A. Turayev, O.G. Turayev, Study of surface condition of Bi-2212 bismuth-based cuprate sample by chemical imaging method // Eurasian Journal of Physics, Chemistry and Mathematics (EJPCM). Brussels (Belgium) - 2024. p 6-9. (01.00.00. (35) CrossRef).

https://geniusjournals.org/index.php/ejpcm/article/view/6244

6. D. Djurayev, A. Turayev, O. Turayev, Investigation of the structure, surface state and electrophysical parameters of BSCCO cuprate // O'zMU xabarlari Toshkent (O'zbekiston) - 3/2.2024, 532-536 b. (01.00.00. № 8).

https://www.academia.edu/126812378/OzMU_xabarlari

7. D.R. Djurayev, A.A. Turayev, O.G'. To'rayev, YBCO-(123) kuprati kritik parametrlarining statistik tahlili va kristal panjara tuzilishi // NamDU ilmiy axborotnamasi Namangan (O'zbekiston). 10/2024, 39-42 b. (01.00.00. № 14). https://journal.namdu.uz/archive/2024-issue-10/maqola-98115-1725671878

8. D.R. Djurayev, A.A. Turayev, O.G'. To'rayev, $Bi_{1.7}Pb_{0.3}Sr_2Ca_nCu_{n-1}O_y$ vismut asosli kupratlarning olinish texnologiyasi // BuxDU ilmiy axboroti. Buxoro (O'zbekiston) - 1/2023. 21-25 b. (01.00.00. № 3).

https://buxdu.uz/media/jurnallar/ilmiy_axborot/ilmiy_axborot_1_son_2023.pdf

9. A.A. Turayev, O.G‘.To‘rayev, S.M.Raximova, Application of superconducting materials in medicine // BuxDU ilmiy axboroti. Buxoro (O‘zbekiston) - 6/2023. 71-75 b. (01.00.00. № 3).
https://uniwork.buxdu.uz/resurs/13222_1_12948BC9FD046DB3EAEBF7EF8231BC67A4677FD4.pdf

II bo’lim (часть II; Part II)

10. Turayev O. Correlation between crystal lattice parameters and critical superconducting properties of YBCO-123: a statistical study // Development of Science. Bukhara (Uzbekistan) – vol. 1, pp. 171-179
https://devos.uz/article.php?id=3392
11. O.G‘. To‘rayev, Yuqori haroratli kuprat o‘ta o‘tkazgichlar va ularning qo‘llanilishi // Iqro jurnali. Andijon (O‘zbekiston) 2025 vol. 14. 991-994 b. https://inlibrary.uz/index.php/iqro/article/view/77037
12. O.G‘. To‘rayev, YBCO kupratining molekular tuzilishi // Iqro jurnali Andijon (O‘zbekiston) – 2025 vol. 15. 766-768 b.
https://inlibrary.uz/index.php/iqro/article/view/104717
13. O. Turayev, Raman spectrometric analysis of atomic bonding in the crystal lattice of the YBCO – 123 sample // Journal of applied science social science. Mandsaur (Hindiston) – 2025 Vol. 15, p 366-370.
https://www.internationaljournal.co.in/index.php/jasass/article/view/1791
14. O. Turayev, High-Temperature Cuprate Superconductors and Their Applications // Journal of applied science social science - Mandsaur (Hindiston) – 2025 Vol.15, p 292-294.
https://www.internationaljournal.co.in/index.php/jasass/article/view/2010
15. O.G. Turayev, Enhanced microstructural homogeneity and compositional distribution of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ superconducting ceramics analyzed by chemical imaging // Journal of Multidisciplinary Sciences and Innovations. Tashkent (Uzbekistan) –vol. 4(10), pp 957-960.
https://ijmri.de/index.php/jmsi/article/view/2842
16. O.G. Turayev, Properties of high-quality YBCO superconductor with enhanced T_c = 98 K: a comprehensive analysis. // (2025). Journal of Multidisciplinary Sciences and Innovations. Tashkent (Uzbekistan) – vol. 4(11), pp 1561-1563. https://ijmri.de/index.php/jmsi/article/view/3690
17. D.R. Djurayev, A.A. Turayev, O.G. Turayev, Spectroscopic analysis of YBCO sample using laser beams (by Raman spectrometry method) // Kogerent optika va lazer fizikasining dolzarb muammolari xalqaro ilmiy anjumani – Toshkent (O‘zbekiston) 6 - 7 noyabr 2024, 93-101 b.
https://test.tdtu.uz/storage/pages/July2026/yy4Yj0C28Sqt1BivZZRA.pdf
18. O Turayev, Types of superconductors and their use in various fields // Tafakku va talqin - Buxoro (O‘zbekiston). 2024-yil, 15-may, 337-341 b.
https://uniwork.buxdu.uz/resurs/12974_1_0F00B40627E0201D6C1070C61D3C9B110B0D9560.pdf

19. Turayev Ozodjon, Bobokulova Mukhtaram, Use of superconductors in industry and production and its prospects // Innovations in technology and science education. (Uzbekistan) July 2023 vol. 2. p 112-117.
https://www.academia.edu/126812000/Use_of_Superconductors_in_Industry_and_Production_and_Its_Prospects

20. D.R. Djurayev, A.A. Turayev, O.G‘. To‘rayev, Yuqori haroratli kuprat o‘ta o‘tkazgichlar va ularning amaliy ahamiyati // Science and innovation international scientific journal. Toshkent (O‘zbekiston) – 2022 vol. 1 UIF-: 8.2 15-22 b. https://scientists.uz/view.php?id=2575

Avtoreferat “Durdona” nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarning mosligi tekshirildi.

Bosishga ruxsat etildi: 28.09.2026-yil. Bichimi 60x84 1/16, «Times New Roman» garniturada raqamli bosma usulida bosildi. Shartli bosma tabog‘i 3,2.
Adadi: 100 nusxa. Buyurtma №688