

## АНОТАЦІЯ

*Шитов М.В.* Особливості флуктуаційної провідності та псевдощільнини у плівках і монокристалах  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  під впливом зовнішніх чинників. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 — «Фізика та астрономія» (10 — Природничі науки). — Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню особливостей впливу на основні електронні процеси, що формують нормальну та надпровідну (НП) фази в високотемпературних надпровідниках (ВТНП), таких факторів як: магнітне поле, опромінення високоенергетичними електронами та довготривале зберігання (старіння) тонких плівок та монокристалів  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (далі -  $\text{YBCO}$ ).

У **вступі** коротко обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, визначені мета та основні завдання досліджень, об'єкти, предмет і методи досліджень. Сформульована та викладена наукова новизна й практична значущість отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок дисертанта, апробацію роботи та публікації за темою дисертації, а також подається інформація про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**Розділ 1 «Основні властивості досліджуваних надпровідників (Огляд літератури)»** присвячено аналізу літературних даних за темою дисертації, а саме: структури, фазової діаграми та фізичних властивостей досліджуваних об'єктів. Розглянуті теоретичні основи фізики високотемпературних надпровідників, зокрема: тонких плівок та монокристалів  $\text{YBCO}$ . Описані основні властивості ВТНП, які відрізняють їх від низькотемпературних надпровідників (НТНП). Охарактеризовано такі поняття, як псевдощільнина та локальні пари, розглянуті різні точки зору на механізм надпровідного спарювання у ВТНП. Наведено відомості про температурні

залежності надлишкової провідності та псевдощільності. Розглянуті процеси які відбуваються у ВТНП при зниженні густини носіїв заряду, обговорено питання щодо анізотропії властивостей та специфіки поведінки локальних пар у ВТНП. Детально досліджено загальну інформацію щодо впливу зовнішніх чинників, таких як: магнітне поле, електронне опромінення та довготривале старіння на ВТНП YBCO.

**У розділі 2 «Об'єкти і методи експериментальних досліджень»** висвітлено процес отримання та процедуру підготовки до вимірювань досліджуваних зразків монокристалів і тонких плівок YBCO. Детально розглянуто методика вирощування монокристалів YBCO та технологію виготовлення тонких плівок за допомогою імпульсного лазерного напилення. Детально обговорено методики нанесення електроконтактів для резистивних досліджень. Надано опис конструкції установки для вимірювання електроопору при низьких температурах, яка використовувалася в роботі. Описані методи вимірювання електроопору при низьких температурах під впливом магнітного поля та електронного опромінення.

**Розділ 3 «Вплив магнітного поля на властивості тонких плівок YBCO»** присвячений дослідженню впливу магнітного поля від 0 до 8 Тл на температурні залежності питомого опору, надлишкової провідності та псевдощільності тонких плівок YBCO.

Вперше проведено аналіз температурної залежності флуктуаційної провідності у магнітному полі. Виявлено, що у магнітному полі приблизно 3 Тл в області двовимірних флуктуацій відбувається перехід від класичної температурної залежності флуктуаційної провідності (ФЛП) 2D Макі-Томпсона (МТ) до несподіваної залежності 2D Асламазова-Ларкіна (АЛ) вище температури 3D-2D кроссовера. З'ясовано, що коли значення магнітного поля перевищує 3 Тл, інтервал надпровідних флуктуацій різко зростає приблизно в 7 разів, а довжина когерентності вздовж осі  $c$  демонструє неочікувану залежність від температури НП переходу, що вказує на перебудову кристалічної структури зразка під впливом магнітного поля.

Показано, що у нульовому магнітному полі, температурна залежність псевдощільності починаючи від температури її відкриття до температури, де все ще працює теорія середнього поля, має широкий максимум при температурі кроссоверу БЕК-БКШ, яка приблизно дорівнює 140 К, що характерно для добре структурованих плівок і монокристалів без двійників.

З'ясовано, що незважаючи на те, що магнітне поле не впливає на питомий опір за високих температур, усі параметри зразків, помітно змінюються при збільшенні поля до 8 Тл, що призводить до помітної зміни форми температурної залежності псевдощільності, незважаючи на те, що температура відкриття псевдощільності та надлишкова провідність вважаються незмінними. В одночас, виявлено помітне зміщення графіку температурної залежності псевдощільності у бік нижчих температур під впливом магнітного поля.

В області НП флуктуацій поблизу температури надпровідного переходу вперше спостерігалось суттєве зменшення значення псевдощільності під впливом магнітного поля. Показано, що різкий низькотемпературний максимум поблизу температури 3D-2D кроссоверу поступово пригнічується, і зміщується в бік вищих температур та потім повністю зникає у магнітному полі вище 5 Тл. Але, починаючи з  $B$  приблизно 0.5 Тл, вище температури Гінзбурга з'являється яскраво виражений мінімум. У той же час, виявлено незвичайну залежність величини псевдощільності при температурі Гінзбурга зі зростанням поля, яка складається з двох лінійних ділянок з однаковим нахилом, але зміщених приблизно на 1 Тл у полях, вищих за 2 Тл. Передбачається, що специфічна еволюція форми псевдощільності, виявлена поблизу температури НП переходу, швидше за все, визначається саме впливом створеної магнітним полем двовимірної вихрової ґратки, що перешкоджає утворенню надпровідних флуктуацій поблизу температури НП переходу.

**У розділі 4 «Вплив сильного електронного опромінення на властивості монокристалів YBCO»** наведено результати дослідження впливу опромінення високоенергетичними електронами на температурні залежності флуктуаційної

провідності (ФЛП) та псевдощілини (ПЩ) монокристала YBCO, який не містить двійників. Електронне опромінення з енергією 2,5 MeV ефективно зміщує всі атоми в кристалі, що призводить до появи безлічі переважно точкових дефектів у площинах CuO<sub>2</sub>. Вплив цих дефектів на ФЛП і ПЩ у ВТНП при великих дозах опромінення раніше не вивчався. Виконання правила Матісена, згідно до якого зі збільшенням дози опромінення опір зростає майже без зміни свого нахилу у нормальному стані, підтверджує відсутність двійників. Показано, що, як і очікувалося, лінійне збільшення питомого опору з подальшим лінійним зменшенням температури НП переходу спостерігається при всіх дозах опромінення. Підтверджено, що за відносно малих доз опромінення лінійну залежність температури НП переходу від дози можна описати теорією розриву пар Абрикосова-Горькова (АГ), а при великих дозах опромінення – теорією Емері-Ківельсона (ЕК), яка враховує пригнічення критичної температури флуктуаціями фази параметра порядку, а вплив безладу, який виникає за рахунок дефектів опромінення, полягає в збільшенні квантових фазових флуктуацій. Таким чином, зі збільшенням дози опромінення має спостерігатися перехід АГ-ЕК.

З'ясовано, що питомий опір та температура НП переходу лінійно залежать від дози опромінення і ніяких особливостей на залежностях питомого опору та температури НП переходу від дози опромінення при АГ-ЕК кроссовері не спостерігається. У той же час виявлено несподіване зростання температури відкриття псевдощілини, значення псевдощілини за температури БЕК-БКШ кроссовера та в цілому всієї кривої псевдощілини при середньому значенні дози опромінення, що відповідає переходу АГ-ЕК, що свідчить про можливе зниження щільності станів на рівні Фермі (DOS) через дефекти. Також показано, що при цій дозі опромінення відстань між провідними площинами, довжина когерентності вздовж осі *c* та площині *ab*, а також область НП флуктуацій різко збільшуються, а флуктуаційний внесок 2D MT несподівано змінюється на 2D AL.

З'ясовано, що при збільшенні дози опромінення до  $\varphi_5 = 5,6 \cdot 10^{19} \text{ e/cm}^2$ , як ФЛП, так і псевдощілина демонструють криві, типові для добре структурованого YBCO, що

підтверджує загальновідомий факт, що “чим більше дефектів, тим більш ізотропним є зразок”. І саме з цього “ізотропного” стану монокристал YBCO під впливом електронного опромінення починає перехід метал-ізолятор.

Таким чином, показано, що відсутність будь-яких особливостей на залежностях питомого опору та критичної температури від дози опромінення вказує на те, що взаємодія дефектів опромінення з нормальними носіями заряду, відповідальними за питомий опір, та з локальними парами (ЛП), відповідальними за ФЛП та ПЩ, істотно відрізняється. Тобто доведено, що вплив дефектів на малі ЛП при високих температурах та на великі, майже НП, флуктуаційні куперівські пари поблизу температури НП переходу, відповідальні за поведінку псевдощілини за температури Гінзубрга, є також абсолютно різним.

З'ясовано, що утворення різноманітних ансамблів дефектів у монокристалах YBCO під впливом високоенергетичного електронного опромінення є немонотонним процесом і має власну специфіку. Показано, що ця специфіка може бути виявлена лише шляхом проведення аналізу ФЛП і ПЩ, які виявилися набагато більш чутливими до змін у внутрішніх електронних підсистемах, уражених індукованими дефектами.

**У розділі 5 «Вплив довготривалого зберігання (старіння) на властивості монокристалів YBCO»** вперше досліджено та проаналізовано вплив тривалого зберігання (старіння), протягом 17 років за нормальних умов, на флуктуаційну провідність та псевдощілину в монокристалах YBCO з двійниками. Вивчення властивостей досліджуваного монокристала проводилися одразу після виготовлення (S1), через 6 років (S2) та 17 років (S3) після виготовлення.

Завдяки зусиллям багатьох наукових груп фізика ВТНП певною мірою стала зрозумілішою. Проте залишається багато питань щодо практичного застосування купратів, одне з головних: “Як довго можливо використовувати ВТНП в різних приладах?”. Таким чином, дослідження ефекту тривалого зберігання купратів на повітрі та за кімнатної температури виявляється дуже важливим, але фактично не

вивченим питанням. Дійсно, кількість робіт, присвячених ефекту тривалого зберігання купратів, на диво мала, а наведені експериментальні дані є дещо суперечливими. Швидше за все це пов'язано з тим, що дані були отримані на зразках з різною технологічною передісторією, наприклад, на тонких плівках, кераміці, текстурованих полікристалах тощо.

У той же час, недоліком монокристалів YBCO, якщо не вживати спеціальних заходів, є наявність у них протяжних плоских дефектів, таких як двійники та двійникові границі (ДГ), що необхідно брати до уваги. Дослідження ФЛП та ПЩ на монокристалах YBCO після 6 та 17 років зберігання без сумніву повинні надати потрібну інформацію про вплив процесу старіння на надпровідні властивості ВТНП. Однак, наскільки нам відомо, такі дослідження раніше не проводилися.

Показано, що зразок S1 демонструє характеристики типові для оптимально допованих монокристалів YBCO, що містять двійники та двійникові границі. Виявлено, що після 6 років зберігання, дефекти, які виникли під час старіння, практично повністю усувають вплив двійників і двійникових границь у зразку. Як наслідок, температурна поведінка як ФЛП, так і ПЩ нагадує типову для добре структурованих монокристалів YBCO. Таким чином було доведено, що високотемпературні надпровідники після 6 років зберігання можна використовувати у різноманітних приладах.

Виявляється, що зі збільшенням часу зберігання ситуація змінюється. Так, з'ясовано, що після 17 років зберігання велика кількість структурних дефектів, які виникають у зразку, призводить до сильної деградації структури та перерозподілу заряду в кристалі, які призводять до сильного зростання опору та, швидше за все, відповідають за спостережувану незвичайну температурну залежність як ФЛП, так і ПЩ. Ми показали, що дефекти які виникають під час тривалого старіння, суттєво впливають як на питомий опір, так і на ФЛП та псевдощілину.

Таким чином доведено, що високотемпературні надпровідники мають певні обмеження щодо терміну їх практичного використання. За наявних даних, можна

стверджувати, що цей час обмежений, як мінімум, терміном близько півтора десятиріччя і, після 17 років зберігання, доповані YBCO ВТНП вже втрачають свої функціональні характеристики.

**Ключові слова:** надпровідність, надпровідна щілина, високотемпературні надпровідники, флуктуаційна провідність, радіаційні дефекти, дворівнева система, псевдощілина, надлишкова провідність, поверхня Фермі, квантова інженерія, допування, монокристали, тонкі плівки, питомий опір, рекомбінація зарядів, магнітне поле, електронне опромінення.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:*

1. E. V. Petrenko, L. V. Omelchenko, Yu. A. Kolesnichenko, **N. V. Shytov**, K. Rogacki, D. M. Sergeyev, and A. L. Solovjov, Study of fluctuation conductivity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films in strong magnetic fields, *Low Temperature Physics*, 47, № 12, 1150-1057, (2021), Q3, DOI: 10.1063/10.0007080.
2. A. L. Solovjov, L. V. Bludova, **M. V. Shytov**, S. N. Kamchatnaya, Z. F. Nazyrov, and R. V. Vovk, Evolution of the pseudogap and excess conductivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystals in the course of long-term aging, *Low Temperature Physics*, 49, № 4, 477-485, (2023), Q3, DOI: 10.1063/10.0017593.
3. E. V. Petrenko, K. Rogacki, A. V. Terekhov, L. V. Bludova, Y. A. Kolesnichenko, **N. V. Shytov**, D. M. Sergeyev, E. Lähderanta, A. L. Solovjov, Evolution of the pseudogap temperature dependence in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films under the influence of a magnetic field, *Low Temperature Physics*, 50, № 4, 299-307, (2024), Q3, DOI: 10.1063/10.0025295.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів:*

1. **M.V. Shytov**, E. V. Petrenko, L. V. Omelchenko, A. L. Solovjov, K. Rogacki, Magneto-resistive study of the excess conductivity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  monolayers, II International Advanced Study Conference “CONDENSED MATTER & LOW TEMPERATURE PHYSICS 2021”, 6 - 12 June 2021, Kharkiv, Ukraine, Poster, P. 9.
2. **M. V. Shytov**, A. L. Solovjov, L. V. Omelchenko, E. V. Petrenko, G. Ya. Khadzhai, D. M. Sergeyev, R. V. Vovk and K. Rogacki, “Effect of electron irradiation on fluctuation conductivity and pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  twin single crystals”, “PHOTON – GRAPHENE INTERACTIONS: PHENOMENA AND APPLICATIONS-2”, 9 – 10 September 2022, Wroclaw, Poland, Abstracts book, P. 45.



3. **M. V. Shytov**, A.L. Solovjov, L. V. Bludova, S.N. Kamchatnaya, Z.F. Nazyrov, R. V. Vovk, “Evolution of the pseudogap and excess conductivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystals in the course of long-term aging”, III International Conference “CONDENSED MATTER & LOW TEMPERATURE PHYSICS 2023”, 5 – 11 June 2023, Kharkiv, Ukraine, Abstracts book, P. 55.
4. **М. В. Шитов**, С. В. Петренко, Л. В. Блудова, Ю.А. Колесніченко, К. Рogaцький, А. Л. Соловйов, “Аналіз флуктуаційної провідності плівок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  у сильних магнітних полях”, IV конференції молодих вчених “СУЧАСНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО: МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ — СММТ-2023”, 5 – 6 October 2023, Kyiv, Ukraine, Abstracts book, P. 9.
5. **M. V. Shytov**, A. L. Solovjov, E. V. Petrenko, L. V. Bludova, R. V. Vovk, K. Rogacki, “Influence of strong electron irradiation on fluctuation conductivity and pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystals”, IV International Conference “CONDENSED MATTER & LOW TEMPERATURE PHYSICS 2024”, 3 – 7 June 2024, Kharkiv, Ukraine, Abstracts book, P. 58.

## ABSTRACT

*Shytov M.V.* Features of fluctuating conductivity and pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films and single crystals under the influence of external factors. — Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for the Philosophical Degree (PhD) in speciality 104—«Physics and Astronomy» (10 — Natural Sciences). — B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the study of the effects of such factors as: magnetic field, irradiation with high-energy electrons, and long-term storage (aging) of thin films and single crystals of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (hereinafter – YBCO) on the main electronic processes that form the normal and superconducting (SC) phases in high-temperature superconductors (HTSCs).

**The introduction** briefly substantiates the relevance of the topic of the dissertation, defines the purpose and main tasks of research, objects, subject and methods of research. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated and explained. Data on the personal contribution of the dissertation student, approval of work and publications on the topic of the dissertation, as well as information on the structure and scope of the dissertation work are provided.

**Chapter 1 “The main properties of the studied superconductors (Literature review)”** is devoted to the analysis of literature data on the topic of the dissertation, namely: the structure, phase diagram, and physical properties of the studied objects. The theoretical foundations of the physics of high-temperature superconductors are considered, namely: thin films and single crystals of YBCO. The main properties of HTSCs, which distinguish them from low-temperature superconductors (LTSCs), are described. Concepts such as pseudogap and local pairs are characterized, different points of view on the mechanism of superconducting pairing in HTSCs are considered. Information on the temperature

dependence of the excess conductivity and the pseudogap is provided. Attention is drawn to the processes that occur in HTSCs when the density of charge carriers decreases, questions are raised regarding the anisotropy of properties and the specifics of the behavior of local pairs in HTSCs. General information on the influence of external factors, such as: magnetic field, electronic irradiation and long-term aging on YBCO HTSC, was studied in detail.

**Chapter 2 “Objects and methods of experimental research”** covers the process of obtaining and the procedure of preparation for measurements of the studied samples of single crystals and thin films of YBCO. The method of growing YBCO single crystals and the technology of manufacturing thin films using pulsed laser sputtering are explained in detail. Methods of applying electrical contacts for resistive studies are discussed in detail. A description of the design of the installation for measuring electrical resistance at low temperatures, which was used in the work, is provided. Methods of measuring electrical resistance at low temperatures under the influence of a magnetic field and electron irradiation are described.

**Chapter 3 “Effect of the magnetic field on the properties of YBCO thin films”** is devoted to the study of the influence of the magnetic field from 0 to 8 T on the temperature dependences of the resistivity, excess conductivity, and pseudogap of YBCO thin films.

For the first time, the temperature dependence of fluctuating conductivity in a magnetic field was analyzed. It was found that in a magnetic field of approximately 3 T in the region of two-dimensional fluctuations, there is a transition from the classical 2D Maki-Thompson (MT) temperature dependence of fluctuating conductivity (FLC) to an unexpected 2D Aslamazov-Larkin (AL) dependence above the 3D-2D crossover temperature. It was found that when the value of the magnetic field exceeds 3 T, the interval of superconducting fluctuations increases sharply by about 7 times, and the coherence length along the *c*-axis shows an unusual dependence on the temperature of the SC transition, which indicates the rearrangement of the crystal structure of the sample under the influence of the magnetic field, which shown in the tables.

It is shown that in a zero magnetic field, the temperature dependence of the pseudogap in the entire temperature range from the temperature of the opening of the pseudogap to the temperature up to which the mean field theory works has a broad maximum at the BEC-BCS crossover temperature, which is approximately equal to 140 K, which is characteristic of well-structured films and single crystals without twins.

It is revealed that despite the fact that the magnetic field does not affect the resistivity at high temperatures, all the parameters of the samples change noticeably when the field increases to 8 T, which leads to a noticeable change in the shape of the temperature dependence of the pseudogap, despite the fact that the temperature pseudogap opening and excess conductivity are assumed to be constant. At the same time, a noticeable shift of the pseudogap curve toward lower temperatures under the influence of the magnetic field was revealed.

In the region of SC fluctuations near the temperature of the superconducting transition, an intense decrease in the value of the pseudogap by the magnetic field was observed for the first time. It is shown that the sharp low-temperature maximum near the 3D-2D crossover temperature is gradually suppressed, and shifts towards higher temperatures and then completely disappears in the magnetic field above 5 T. But starting with  $B$  of about 0.5 T, a pronounced minimum appears above the Ginzburg temperature. At the same time, an unusual dependence of the value of the pseudogap at the Ginzburg temperature with increasing field was revealed, which consists of two linear sections with the same slope, but shifted by approximately 1 T at a magnetic field greater than 2 T. It is proved that the specific evolution of the shape of the pseudogap, detected near the temperature of the SC transition, is most likely determined precisely by the influence of the two-dimensional vortex lattice created by the magnetic field, which prevents the formation of superconducting fluctuations near the temperature of the SC transition.

**Chapter 4 “The effect of strong electron irradiation on the properties of YBCO single crystals”**, presents the results of the study of the effect of high-energy electron irradiation on the temperature dependence of the fluctuation conductivity (FLC) and

pseudogap (PG) of a YBCO single crystal that does not contain twins. Electron irradiation with an energy of 2.5 MeV effectively displaces all atoms in the crystal, which leads to the appearance of a set of mostly point defects in the CuO<sub>2</sub> planes. The influence of these defects on FLC and PG in HTSC with high doses of irradiation has not been studied before. The fulfillment of Matthiessen's rule, according to which as the radiation dose increases, the resistance increases almost without changing its slope in the normal state, confirms the absence of twins. It is shown that, as expected, a linear increase in resistivity followed by a linear decrease in the temperature of the SC transition is observed at all irradiation doses. It has been confirmed that for relatively small doses of radiation, the linear dependence of the temperature of the SC transition on the dose can be described by the theory of breaking of Abrikosov-Gorkov (AG) pairs, and at high doses of irradiation – by the theory of Emery-Kivelson (EK), which takes into account the suppression of the critical temperature by fluctuations of the phase of the order parameter, and the effect of disorder, which arises due to irradiation defects, and increases the quantum phase fluctuations. Thus, with an increase in the radiation dose, the AG-EK transition should be observed.

It is shown that the resistivity and the temperature of the SC transition depend linearly on the radiation dose, and no peculiarities in the dependences of the resistivity and temperature of the SC transition on the irradiation dose are observed at the AG-EK crossover. At the same time, an unexpected increase in the temperature of the opening of the pseudogap, the value of the pseudogap at the temperature of the BEC-BCS crossover and, in general, the entire curve of the pseudogap at the average value of the irradiation dose corresponding to the AG-EK transition is revealed, which indicates a possible decrease in the density of states at the Fermi level (DOS) due to defects. It is also shown that at this radiation dose, the distance between the conducting planes, the coherence length, both along the *c*-axis and the *ab* plane, as well as the SC fluctuation region increase dramatically, and the fluctuation contribution of 2D MT unexpectedly changes to 2D AL.

It was found that with the further increase in the irradiation dose to  $\varphi_5 = 5.6 \cdot 10^{19}$  e/cm<sup>2</sup>, both the FLC and the pseudogap show curves typical of well-structured YBCO, from which it

was concluded that “The more defects, the more isotropic the sample” And it is from this “isotropic” state that the YBCO single crystal begins the metal-insulator transition under the influence of electron irradiation.

Thus, it is shown that the absence of any features on the dependences of the resistivity and critical temperature on the irradiation dose indicates that the interaction of irradiation defects with normal charge carriers responsible for the resistivity and with LPs responsible for FLC and PG is significantly different. That is, it has been proven that the effect of defects on small LPs at high temperatures and on large, almost SC, fluctuating Cooper pairs near the SC transition temperature, which are responsible for the behavior of the pseudogap at the Ginzburg temperature, is also completely different.

It was found that the formation of various ensembles of defects in YBCO single crystals under the influence of high-energy electron irradiation is a non-monotonic process and has its own specificity. It is shown that this specificity can be detected only by conducting an analysis of FLC and PG, which turned out to be much more sensitive to changes in internal electronic subsystems affected by induced defects.

**In chapter 5, “Effect of long-term storage (aging) on the properties of YBCO single crystals”**, the effect of long-term storage (aging) for 17 years under normal conditions on the fluctuating conductivity and pseudogap in twinned YBCO single crystals was investigated and analyzed for the first time. The properties of the investigated single crystal were measured immediately after manufacture (S1), 6 (S2) and 17 years (S3) after manufacture.

Thanks to the efforts of many scientific groups, the physics of HTSC has become somewhat clearer. However, many questions remain regarding the practical use of cuprates, one of the main ones being: “How long is it possible to use HTSC in various devices?”. Thus, the study of the effect of long-term storage of cuprates in air and at room temperature turns out to be a very important, but actually unstudied issue. Indeed, the number of works devoted to the effect of long-term storage of cuprates is surprisingly small, and the given experimental data are somewhat contradictory. Most likely, this is due to the fact that the

data were obtained on samples with different technological backgrounds, for example, on thin films, ceramics, textured polycrystals, etc.

At the same time, the disadvantage of YBCO single crystals, if no special measures are taken, is the presence of extended planar defects such as twins and twin boundaries (TBs), which must be taken into account. Studies of fluctuation conductivity (FLC) and pseudogap (PG) on YBCO single crystals after 6 and 17 years of storage should undoubtedly provide the necessary information about the effect of the aging process on the superconducting properties of HTSCs. However, to the best of our knowledge, such studies have not been conducted before.

In this section, for the first time, the temperature dependences of FLC, excess conductivity, and pseudogap were investigated and new data were obtained based on measurements of the resistivity of an optimally doped YBCO single crystal, which was studied immediately after fabrication (S1), 6 (S2), and 17 years (S3) after fabrication.

It is shown that sample S1 exhibits characteristics typical of optimally doped YBCO single crystals containing twins and twin boundaries. It was found that after 6 years of storage, defects that arose during aging almost completely eliminate the influence of twins and twin boundaries in the sample. As a result, the temperature behavior of both the FLC and the PG resembles that typical for well-structured YBCO single crystals. Thus, it has been proven that high-temperature superconductors can be used in various devices after 6 years of storage.

It is shown that the situation changes with an increase in storage time. Thus, it was found that after 17 years of storage, a large number of structural defects that appear in the sample lead to a strong degradation of the structure and redistribution of charge in the crystal, which lead to a strong increase in resistance and, most likely, are responsible for the observed unusual temperature dependence both FLC and PG. It is shown that the defects that arise during long-term aging significantly affect both the resistivity and the FLC and the pseudogap.

Thus, it has been proven that high-temperature superconductors have certain limitations regarding the term of their practical use. According to the available data, it can be stated that this time is limited, at least, to a period of about one and a half decades and, after 17 years of storage, YBCO-doped HTSCs already lose their functional characteristics.

**Key words:** superconductivity, superconducting gap, high-temperature superconductors, fluctuation conductivity, radiation defects, two-level system, pseudogap, excess conductivity, Fermi surface, quantum engineering, doping, single crystals, thin films, resistivity, charge recombination, magnetic field, electron irradiation.



*LIST OF PUBLICATIONS OF THE CANDIDATE BY THE TOPIC OF THE  
DISSERTATION*

*Scientific works in which the main results of the dissertation are published:*

1. **M. V. Shytov**, E. V. Petrenko, L. V. Omelchenko, Yu. A. Kolesnichenko, K. Rogacki, D. M. Sergeyev, and A. L. Solovjov, Study of fluctuation conductivity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films in strong magnetic fields, *Low Temperature Physics*, 47, № 12, 1150-1057, (2021), Q3,  
DOI: 10.1063/10.0007080.
2. **M.V. Shytov**, A.L. Solovjov, L.V. Bludova, S.N. Kamchatnaya, Z.F. Nazyrov, and R. V. Vovk, Evolution of the pseudogap and excess conductivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystals in the course of long-term aging, *Low Temperature Physics*, 49, № 4, 477-485, (2023), Q3,  
DOI: 10.1063/10.0017593.
3. **M. V. Shytov**, E. V. Petrenko, K. Rogacki, A. V. Terekhov, L. V. Bludova, Y. A. Kolesnichenko, D. M. Sergeyev, E. Lähderanta, A. L. Solovjov, Evolution of the pseudogap temperature dependence in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films under the influence of a magnetic field, *Low Temperature Physics*, 50, № 4, 299-307, (2024), Q3,  
DOI: 10.1063/10.0025295.

*Scientific works certifying the approbation of the results:*

1. **M.V. Shytov**, E. V. Petrenko, L. V. Omelchenko, A. L. Solovjov, K. Rogacki, Magneto-resistive study of the excess conductivity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  monolayers, II International Advanced Study Conference “CONDENSED MATTER & LOW TEMPERATURE PHYSICS 2021”, 6 - 12 June 2021, Kharkiv, Ukraine, Poster, P. 9.
2. **M. V. Shytov**, A. L. Solovjov, L. V. Omelchenko, E. V. Petrenko, G. Ya. Khadzhai, D. M. Sergeyev, R. V. Vovk and K. Rogacki, “Effect of electron irradiation on fluctuation

- conductivity and pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  twin single crystals”, “PHOTON – GRAPHENE INTERACTIONS: PHENOMENA AND APPLICATIONS-2”, 9 – 10 September 2022, Wroclaw, Poland, Abstracts book, P. 45.
3. **M. V. Shytov**, A.L. Solovjov, L. V. Bludova, S.N. Kamchatnaya, Z.F. Nazyrov, R. V. Vovk, “Evolution of the pseudogap and excess conductivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystals in the course of long-term aging”, III International Conference “CONDENSED MATTER & LOW TEMPERATURE PHYSICS 2023”, 5 – 11 June 2023, Kharkiv, Ukraine, Abstracts book, P. 55.
  4. **M. V. Shytov**, E. V. Petrenko, L. V. Omelchenko, Yu. A. Kolesnichenko, K. Rogacki, D. M. Sergeyev, and A. L. Solovjov, Study of fluctuation conductivity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films in strong magnetic fields”, IV conference of young scientists "MODERN MATERIALS SCIENCE: MATERIALS AND TECHNOLOGIES — CMMT-2023", 5 – 6 October 2023, Kyiv, Ukraine, Abstracts book, P. 9.
  5. **M. V. Shytov**, A. L. Solovjov, E. V. Petrenko, L. V. Bludova, R. V. Vovk, K. Rogacki, “Influence of strong electron irradiation on fluctuation conductivity and pseudogap in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  single crystals”, IV International Conference “CONDENSED MATTER & LOW TEMPERATURE PHYSICS 2024”, 3 – 7 June 2024, Kharkiv, Ukraine, Abstracts book, P. 58.



*Mykhailo SHYTOV*