

## АНОТАЦІЯ

*Лега О. О.* Нестационарні процеси в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному електромагнітному полі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

В дисертаційній роботі представлено результати експериментальних досліджень нестационарних процесів в просторово-неоднорідних надпровідних структурах в надвисокочастотному (НВЧ) електромагнітному полі.

У **вступі** коротко обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та основні завдання дослідження, також об'єкт, предмет та методи дослідження. Сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації. Також приведені відомості про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**Розділ 1** присвячено огляду та аналізу літератури за темою дисертації. В цьому розділі розглянуто основні явища, які виникають у надпровідних структурах.

Проведено аналіз низки структур та елементів сучасної низькотемпературної електроніки, які є предметом дослідження дисертаційної роботи, а саме – тонкі надпровідні плівки, надпровідні спіральні резонатори та надпровідні квантові інтерференційні детектори (НКВІДи, SQUID – Superconducting Quantum Interference Device). Продемонстровані обмеження, які виникають при використанні таких структур, зокрема проблема розподілу надпровідних струмів, особливості формування резистивних і нормальних станів у надпровідних плівках та поведінка НКВІДів. Окремо обговорено проблеми одного із найбільш актуальних застосувань елементів надпровідних резонуючих структур, а саме – для створення електромагнітних метаматеріалів.

Обговорено основні мікроскопічні методи дослідження надпровідних структур. Особлива увага приділена методу лазерної скануючої мікроскопії та особливостям його застосування в області низьких температур – низькотемпературній лазерній скануючій мікроскопії (НТЛСМ).

**Розділ 2** присвячено експериментальному дослідженню особливостей переходу тонкоплівкових надпровідників у нормальний стан. За допомогою методу НТЛСМ показано, що під впливом постійного транспортного струму та електромагнітного НВЧ випромінювання в процесі переходу до нормального стану надпровідник проходить проміжний нестабільний і нерівноважний резистивний стан, який характеризується утворенням ліній проковзування фази (ЛПФ) з подальшим утворенням нормальних локалізованих доменів (НЛД). Таким чином, за допомогою експерименту було з'ясовано, що спільна дія НВЧ поля та постійного струму на надпровідну тонкоплівкову структуру не є адитивною. У сильних електромагнітних НВЧ полях, що руйнують надпровідність, виникають і множаться дискретні НЛД, локалізовані на розмірі ЛПФ, які їх породили, що не призводить до зміни форми вольт-амперних характеристик (ВАХ). На жаль, стандартний підхід вивчення переходів надпровідників в нормальний стан за допомогою ВАХ не може розкрити всі деталі цього процесу. Тому перевагою використання методу НТЛСМ є візуалізація досліджуваних явищ і структур, що розкриває нові деталі станів надпровідника, тобто утворення стабільних нормальних структур – НЛД на місці утворених ЛПФ. Зокрема, криві ВАХ можуть вказати лише на існування ЛПФ або НЛД, але не на розташування цих структур у надпровіднику, що також можливо побачити за допомогою методу НТЛСМ.

Показано, що процес проковзування фази притаманний не тільки квазіодновимірним надпровідним каналам, а й 2D і 3D надпровідним структурам. На прикладі двовимірної структури зі змінним значенням перерізу – місток Даєма – методом НТЛСМ проведено візуалізацію утворення ЛПФ, які формуються у вигляді дуг концентричних кіл.

**Розділ 3** присвячено дослідженню розподілу надпровідних екрануючих струмів у надпровідному спіральному резонаторі. Дане дослідження особливо важливе для розуміння можливості застосування надпровідних спіральних резонаторів для побудови електромагнітних метаматеріалів, оскільки їх особливості головним чином залежать від резонансних характеристик метаатомів.

Продемонстровано новий метод візуалізації просторового розподілу струмів у об'ємі надпровідних спіральних резонаторів. Запропоновано та розроблено режим низькотемпературного лазерного скануючого мікроскопа для отримання інформації щодо фази надпровідних екрануючих струмів, тобто їх напрямку в надпровіднику. Фазочутливий контраст досягається за рахунок синхронізації модульованого по інтенсивності лазерного випромінювання з резонансними гармоніками НВЧ-сигналу, що проходить через зразок. У цьому випадку втрати, індуковані лазерним променем в області, що освітлюється, будуть сильно залежати від локальної різниці фаз між ВЧ-несучим сигналом і просторово-часової структурою сфокусованого лазерного коливання. Такий підхід усуває апаратні обмеження існуючої методики радіочастотної мікроскопії та виводить режим фазочутливої демодуляції на рівень, необхідний для вивчення фізики надпровідних метаматеріалів.

За допомогою нефазочутливого, «скалярного», режиму НТЛСМ з'ясовано, що на високих модах стоячих хвиль розподіл надпровідних струмів стає анізотропним, що вказує на те, що резонатор перестає поводити себе як зосереджений елемент та унеможливорює його використання в якості структурних елементів метаматеріалів на заданих частотах. В фазочутливому режимі експериментально досліджено розподіл струмів для перших декількох мод стоячих хвиль у спіральному резонаторі та показано напрямок їх розповсюдження в зразку.

В **Розділі 4** проведено аналіз впливу НВЧ електромагнітного поля на амплітудно-частотні характеристики високочастотного ВЧ НКВДу, а також проведено експериментальну перевірку.

Показано, що при низькому значенні критичного струму в джозефсонівському контакті ВЧ НКВІДу, а отже і параметра  $\beta_L$ , поведінка ВЧ НКВІДу добре узгоджується з аналітичною теоретичною моделлю. Для дослідження впливу НВЧ поля на поведінку ВЧ НКВІДу використовувалася базова схема роботи пристрою, за якої інтерферометр індуктивно пов'язаний з резонансним контуром, що збуджується ВЧ-струмом з частотою, близькою до резонансної частоти контуру. Показано, що параметр  $\beta_L$ , який визначає гістерезисний або безгістерезисний режими роботи пристрою, може бути ефективно налаштований на потрібне значення шляхом впливу високочастотного поля певної амплітуди і частоти, значно вищої за резонансну частоту контуру. Результати експериментального дослідження підтвердили можливість переведення ВЧ НКВІДу із гістерезисного режиму у режим, формально схожий на безгістерезисний та показали значне збільшення коефіцієнту перетворення та чутливості ВЧ НКВІДу за таких налаштувань.

Зазначимо, що результати дисертаційної роботи мають досить актуальне практичне та наукове значення, оскільки розширюють наявні уявлення про особливості утворення нестационарних станів у просторово-неоднорідних надпровідних структурах у НВЧ полі. Зокрема, створюють основу для розробки нової концепції дослідження фазових характеристик НТЛСМ-відгуку двомірних магнітних метаматеріалів. В тому числі, результати дослідження тонкоплівкових надпровідників дозволяють розширити уявлення про особливості переходу до нормального стану, а за допомогою методу НТЛСМ можна візуалізувати розвиток нормального стану в надпровідних структурах. Показано можливість керування ефективним параметром  $\beta_L$  ВЧ НКВІДу, а, відповідно, і значенням критичного струму Джозефсонівського контакту. Це дозволяє нівелювати розкид струмів, які виникають в джозефсонівських переходах, що складаються, наприклад, з двозонних надпровідників і високотемпературних надпровідників у нових ВЧ НКВІДах. Більш того, завдяки запропонованим параметрам спостерігається значне збільшення коефіцієнта перетворення та чутливості ВЧ НКВІДу.

**Ключові слова:** надпровідність, надпровідник, НВЧ поле, резистивний стан, лінія проковзування фази, низькотемпературна лазерна скануюча мікроскопія, метаматеріал, спіральний резонатор, локалізований нормальний домен, ВЧ НКВІД, гістерезисний і безгістерезисний режими, електромагнітне поле, джозефсонівський перехід, керування критичним струмом, коефіцієнт перетворення.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. **A. A. Leha**, A. P. Zhuravel, A. Karpov, A. V. Lukashenko and A. V. Ustinov, “Phase-resolved visualization of radio-frequency standing waves in superconducting spiral resonator for metamaterial applications”, *Low Temp. Phys.*, vol. 48, no. 2, pp. 104–112, 2022, Q3  
DOI: 10.1063/10.0009288
2. O. G. Turutanov, A. G. Sivakov, **A. A. Leha**, A. S. Pokhila, A. E. Kolinko and M. Grajcar, “Some aspects of the resistive-to-normal state transition caused by direct and microwave currents in superconducting thin films with phase slip lines”, *Low Temp. Phys.*, vol. 50, no. 4, pp. 289–298, 2024, Q3  
DOI: 10.1063/10.0025294
3. V. I. Shnyrkov, V. Yu. Lyakhno, O. A. Kalenyuk, D. G. Mindich, **O. O. Leha**, A. P. Shapovalov, “Control of the effective value of the critical current of the RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field”, *Low Temp. Phys.*, vol. 50, no. 6, pp. 497–501, 2024, Q3  
DOI: [10.1063/10.0026089](https://doi.org/10.1063/10.0026089)

*Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів:*

4. **A.A. Leha**, A.P. Zhuravel, A. Karpov, A.V. Lukashenko, A.V. Ustinov, “Phase-Resolved Visualization of Radio Frequency Standing Waves in Superconducting

- Spiral Resonator for Metamaterial Applications”, II International Advanced Study Conference “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2021” (CM&LTP 2021), 6-12 June, 2021, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 227 (2021).
5. **A.A. Leha**, A.P. Zhuravel, A. Karpov, A.V. Ustinov, “Phase Sensitive Imaging of Microwave Signal Propagation in Superconducting Metamaterials”, 2021 IEEE 11<sup>th</sup> International Conference “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2021), 5-11 September, 2021, Odesa, Ukraine, Poster.
  6. **A.A. Leha**, A.P. Zhuravel, A.V. Ustinov, “Technological Limitations and Performances of Superconducting Metamaterial: Laser Scanning Microscopy Analysis”, III International Advanced Study Conference “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2023” (CM&LTP 2023), 5-11 June, 2021, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p.227 (2023).
  7. V.I. Shnyrkov, V.Yu. Lyakhno, O.G. Turutanov, **O.O. Leha**, “Control of the effective value of  $\beta_L$  parameter in an RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field”, IV International Conference “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2024” (CM&LTP 2024), 3-7 June, 2024, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 235 (2024).
  8. V. Yu. Lyakhno, O. G. Turutanov, **O. O. Leha**, “Control of the effective value of  $\beta_L$  parameter in an RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field for application in RF-SQUID based metamaterials”, XII International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2024), 24-28 August, 2024, Uzhhorod, Ukraine, Abstracts.

## ABSTRACT

*Leha O.O.* Nonstationary Processes in Spatially Inhomogeneous Superconducting Structures in Electromagnetic Microwave Fields. – Qualification scientific work printed as manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Speciality 104 – Physics and Astronomy (Field of Knowledge 10 – Natural Sciences). — B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The thesis presents the results of experimental studies on non-stationary processes in spatially inhomogeneous superconducting structures under microwave (MW) electromagnetic fields.

**The introduction** briefly substantiates the relevance of the thesis topic and defines the research goals and main objectives, as well as the object, subject, and methods of research. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated. Information about publications, the personal contribution of the researcher, and the approbation of the thesis results are provided. The structure and volume of the thesis are also described.

**Chapter 1** is dedicated to the review and analysis of literature on the thesis topic. This chapter examines the main phenomena that occur in superconducting structures. An analysis of several structures and elements of modern low-temperature electronics, which are the subject of the thesis research, is conducted, namely thin superconducting films, superconducting helical resonators, and superconducting quantum interference devices (SQUIDs). The limitations that arise when using such structures are demonstrated, including the problem of superconducting current distribution, the formation of resistive and normal states in superconducting films, and the behavior of SQUIDs. Separate attention is given to the problems of one of the most relevant applications of superconducting resonant structure elements, namely, the creation of electromagnetic metamaterials.

Key microscopic methods for studying superconducting structures have been discussed. Special attention is given to the laser scanning microscopy method and its

application features in the low-temperature region – low-temperature laser scanning microscopy (LTLSM).

**Chapter 2** is dedicated to the experimental study of the transition features of thin-film superconductors to the normal state. Using the LTLSM method, it is shown that under the influence of a constant transport current and electromagnetic microwave radiation, the superconductor goes through an intermediate unstable and nonequilibrium resistive state during the transition to the normal state, characterized by the formation of phase slip lines (PSLs) followed by the formation of normal localized domains (NLDs). Thus, the experiment revealed that the combined effect of microwave radiation and constant current on the superconducting thin-film structure is not additive. In strong electromagnetic microwave fields that destroy superconductivity, discrete NLDs arise and multiply, localized at the size of the PSLs that generated them, which does not lead to a change in the shape of the current-voltage characteristics (I-V characteristics). Unfortunately, the standard approach to studying superconducting transitions to the normal state using I-V characteristics cannot reveal all the details of this process. Therefore, the advantage of using the LTLSM method is the visualization of the phenomena and structures under study, revealing new details of the superconducting states, namely, the formation of stable normal structures - NLDs at the location of the formed PSLs. Specifically, I-V characteristics curves can only indicate the existence of PSLs or NLDs, but not their location within the superconductor, which can be visualized using the LTLSM method.

It is shown that the phase slip process is inherent not only to quasi-one-dimensional superconducting channels but also to 2D and 3D superconducting structures. Using the example of a two-dimensional structure with variable cross-section - the Dayem bridge - the LTLSM method was used to visualize the formation of PSLs, which are formed in the shape of arcs of concentric circles.

**Chapter 3** is dedicated to the study of the distribution of superconducting screening currents in a superconducting spiral resonator. This research is particularly important for understanding the potential application of superconducting spiral resonators in the construction of electromagnetic metamaterials, as their characteristics mainly depend on the resonant properties of meta-atoms.



A new method for visualizing the spatial distribution of currents within superconducting spiral resonators has been demonstrated. A mode for a low-temperature laser scanning microscope has been proposed and developed to obtain information about the phase of the superconducting screening currents, i.e., their direction in the superconductor. Phase-sensitive contrast is achieved by synchronizing the modulated intensity of the laser radiation with the resonance harmonics of the microwave signal passing through the sample. In this case, the losses induced by the laser beam in the illuminated area will strongly depend on the local phase difference between the RF carrier signal and the spatiotemporal structure of the focused laser oscillation. This approach eliminates the hardware limitations of the existing radio-frequency microscopy method and advances the phase-sensitive demodulation mode to a level necessary for studying the physics of superconducting metamaterials.

Using the non-phase-sensitive, "scalar," mode of the low-temperature laser scanning microscope (LTSLM), it was found that at higher standing wave modes, the distribution of superconducting currents becomes anisotropic, indicating that the resonator ceases to behave as a lumped element and cannot be used as structural elements of metamaterials at given frequencies. In the phase-sensitive mode, the distribution of currents for the first few standing wave modes in the spiral resonator was experimentally studied, and the direction of their propagation in the sample was shown.

**Chapter 4** analyzes the influence of the microwave electromagnetic field on the amplitude-frequency characteristics of a high-frequency RF SQUID, as well as an experimental verification.

It has been shown that with a low critical current value in the Josephson junction of the RF SQUID, and thus a low  $\beta_L$  parameter, the behavior of the RF SQUID is well aligned with the analytical theoretical model. To study the influence of the microwave field on the behavior of the RF SQUID, a basic operating scheme of the device was used, in which the interferometer is inductively coupled to the resonant circuit, excited by an RF current with a frequency close to the resonant frequency of the circuit. It has been shown that the  $\beta_L$  parameter, which determines the hysteretic or non-hysteretic modes of operation of the device, can be effectively tuned to the desired value by

exposing the device to a high-frequency field of a certain amplitude and frequency, significantly higher than the resonant frequency of the circuit. The experimental results confirmed the possibility of switching the RF SQUID from a hysteretic mode to a formally non-hysteretic mode and showed a significant increase in the conversion coefficient and sensitivity of the RF SQUID under such settings.

Note that the results of the thesis work are quite relevant both practically and scientifically, as they expand the existing understanding of the features of the formation of non-stationary states in spatially inhomogeneous superconducting structures in microwave fields. In particular, the findings provide a foundation for developing a new concept for studying the phase characteristics of LTLSM-response in two-dimensional magnetic metamaterials. Additionally, the results of thin-film superconductor studies allow for a better understanding of the transition to the normal state, and using the LTLSM method, the development of the normal state in superconducting structures can be visualized. It has been shown that it is possible to control the effective parameter  $\beta_L$  of the RF SQUID, and accordingly, the value of the critical current of the Josephson junction. This allows for leveling the variations in currents that occur in Josephson junctions made, for example, from two-band superconductors and high-temperature superconductors in new RF SQUIDS. Moreover, thanks to the proposed parameters, a significant increase in the conversion coefficient and sensitivity of the RF SQUID is observed.

**Keywords:** superconductivity, superconductor, microwave, resistive state, phase slip line, low-temperature laser scanning microscopy, metamaterial, spiral resonator, localized normal domain, RF SQUID, hysteretic and non-hysteretic regimes, electromagnetic field, Josephson junction, critical current control, conversion coefficient.

## LIST OF PUBLICATIONS OF THE CANDIDATE BY THE TOPIC OF THE THESIS

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

1. **A. A. Leha**, A. P. Zhuravel, A. Karpov, A. V. Lukashenko and A. V. Ustinov, “Phase-resolved visualization of radio-frequency standing waves in superconducting spiral resonator for metamaterial applications”, *Low Temp. Phys.*, vol. 48, no. 2, pp. 104–112, 2022, Q3  
DOI: 10.1063/10.0009288
2. O. G. Turutanov, A. G. Sivakov, **A. A. Leha**, A. S. Pokhila, A. E. Kolinko and M. Grajcar, “Some aspects of the resistive-to-normal state transition caused by direct and microwave currents in superconducting thin films with phase slip lines”, *Low Temp. Phys.*, vol. 50, no. 4, pp. 289–298, 2024, Q3  
DOI: 10.1063/10.0025294
3. V. I. Shnyrkov, V. Yu. Lyakhno, O. A. Kalenyuk, D. G. Mindich, **O. O. Leha**, A. P. Shapovalov, “Control of the effective value of the critical current of the RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field”, *Low Temp. Phys.*, vol. 50, no. 6, pp. 497–501, 2024, Q3  
DOI: [10.1063/10.0026089](https://doi.org/10.1063/10.0026089)

*Scientific works certifying the approbation of the results:*

1. **A.A. Leha**, A.P. Zhuravel, A. Karpov, A.V. Lukashenko, A.V. Ustinov, “Phase-Resolved Visualization of Radio Frequency Standing Waves in Superconducting Spiral Resonator for Metamaterial Applications”, II International Advanced Study Conference “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2021” (CM&LTP 2021), 6-12 June, 2021, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 227 (2021).
2. **A.A. Leha**, A.P. Zhuravel, A. Karpov, A.V. Ustinov, “Phase Sensitive Imaging of Microwave Signal Propagation in Superconducting Metamaterials”, 2021 IEEE 11<sup>th</sup>

International Conference “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2021), 5-11 September, 2021, Odesa, Ukraine, Poster.

3. **A.A. Leha**, A.P. Zhuravel, A.V. Ustinov, “Technological Limitations and Performances of Superconducting Metamaterial: Laser Scanning Microscopy Analysis”, III International Advanced Study Conference “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2023” (CM&LTP 2023), 5-11 June, 2021, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p.227 (2023).
4. V.I. Shnyrkov, V.Yu. Lyakhno, O.G. Turutanov, **O.O. Leha**, “Control of the effective value of  $\beta_L$  parameter in an RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field”, IV International Conference “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2024” (CM&LTP 2024), 3-7 June, 2024, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 235 (2024).
5. V. Yu. Lyakhno, O. G. Turutanov, **O. O. Leha**, “Control of the effective value of  $\beta_L$  parameter in an RF SQUID by the high-frequency electromagnetic field for application in RF-SQUID based metamaterials”, XII International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2024), 24-28 August, 2024, Uzhhorod, Ukraine, Abstracts.



(Лєга О.О.)