ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Шукринова Юрия Маджнуновича, ведущего научного сотрудника Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Международной межправительственной научно-исследовательской организации Объединенный институт ядерных исследований на диссертацию **Кузьмичевой Татьяны Евгеньевны «Сверхпроводящий параметр порядка пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Т.Е. Кузьмичевой посвящена экспериментальному определению основных энергетических параметров сверхпроводящего состояния и оценке типа симметрии куперовского спаривания в железосодержащих пниктидах и халькогенидах родственных семейств Ba-122, 122-Se и 1144.

Исследование железосодержащих сверхпроводников является одной из ключевых и наиболее динамично развивающихся областей современной физики конденсированного состояния. Эти многозонные слоистые материалы демонстрируют новую интересную физику, связанную с взаимодействием сверхпроводимости, магнетизма и нематичности. Несмотря на большое количество имеющихся в мировой литературе экспериментальных данных, вопрос о механизме куперовского спаривания, обеспечивающем довольно высокие критические температуры (до $T_c \approx 57$ К в объемных образцах при атмосферном давлении), до сих пор остается дискуссионным. Методы туннельной спектроскопии позволяют получить информацию о фундаментальных характеристиках сверхпроводника, определить их температурную зависимость, а также оценить тип симметрии куперовского спаривания. Проведенное Т.Е. Кузьмичевой систематическое исследование структуры сверх-проводящего параметра порядка пниктидов и селенидов семейств 122 и 1144 двумя взаимодополняющими методами туннельной спектроскопии представляется чрезвычайно важным и **актуальным**.

Новизна диссертационного исследования определяется следующими факторами. Щелевая структура селенидов составов $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ семейства 122-Se, пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ в передопированной области фазовой диаграммы, 1144-пниктидов $EuCsFe_4As_4$ (с сосуществованием дальнего ферромагнитного порядка и сверхпроводимости) была определена Т.Е. Кузьмичевой впервые. Также не имеют аналогов в мировой литературе проведенные в диссертации

сравнения сверхпроводящих свойств магнитных и немагнитных пниктидов нового семейства 1144, щелевой структуры пниктидов изоструктурных семейств 122 и 1144, полученные оценки «малых» констант связи и силы внутри- и межзонного взаимодействия многозонных пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$, $EuCsFe_4As_4$ и $CaKFe_4As_4$.

Фундаментальная важность работы Т.Е. Кузьмичевой не вызывает сомнений: полученные результаты о структуре и симметрии сверхпроводящего параметра порядка, его эволюции при допировании отвечают на многие нерешенные вопросы о сходстве и различии сверхпроводящих свойств изоструктурных материалов семейств 122 и 1144 и открывают возможности для уточнения и расширения теоретических представлений о механизме высокотемпературной сверхпроводимости пниктидов и селенидов железа. Продемонстрированная автором возможность получения и анализа нормированной температурной зависимости критического тока $I_c(T)/I_c(0)$ как для межзеренных границ, так и для объема зерна в поликристаллах методом создания контактов на микротрещине уникальна и имеет значительный потенциал **практического использования** для определения оптимального температурного диапазона эксплуатации проводов и лент на основе поликристаллических железосодержащих материалов.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения, списка сокращений и списка литературы. Общий объем диссертации — 298 страниц, включая 116 рисунков и 7 таблиц, список литературы содержит 417 наименований.

Введение содержит постановку научной проблемы, обоснование ее актуальности, описываются цели и задачи проведенного диссертационного исследования, их новизна, фундаментальная и практическая значимость полученных результатов. Приведено описание структуры диссертации, список положений, выносимых на защиту, публикаций и тезисов докладов по теме работы.

В **Главе 1** приведен обзор имеющихся в мировой литературе сведений о кристаллической и зонной структуре и фазовой диаграмме выбранных объектов исследования. Отдельное внимание уделено описанию результатов теоретических и экспериментальных исследований механизмов куперовского спаривания, типа симметрии сверхпроводящего параметра порядка, спинового резонанса и влияния примесей на сверхпроводящие свойства железосодержащих сверхпроводников семейств 122 и 1144.

Глава 2 посвящена методологии проведенного исследования: описанию техники создания планарных контактов на микротрещине, видов получаемых туннельных структур и описание имеющихся теоретических моделей, техники регистрации их вольт-амперных характеристик и спектров дифференциальной проводимости, данных первичной характеризации исследованных образцов. Особо хочется отметить проведенную автором систематизацию возможных туннельных режимов, которые могут быть получены с помощью техники «контакт на микротрещине»: в работе приведен подробный анализ теоретических предсказаний вида особенностей субгармонической щелевой структуры SnS-контактов в зависимости от температуры, прозрачности и ширины туннельного барьера, типа симметрии сверхпроводящей щели. Систематизированы факторы, влияющие на амплитуду андреевского избыточного тока SnS-контакта в рамках различных моделей.

В **Главе 3** приведено исследование щелевой структуры сверхпроводящей фазы селенидов $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$. Тремя методами однозначно подтверждено существование ниже T_c куперовских пар с сильной связью и единственным значением энергии связи $|2\Delta|$, определена температурная зависимость сверхпроводящей щели $|\Delta(T)|$ и критического тока $I_c(T)/I_c(0)$.

Глава 4 посвящена туннельной спектроскопии пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ недо-, оптимально и передопированных составов с номинальной степенью замещения x = 0.08, 0.1, 0.12 и 0.14. С помощью андреевской спектроскопии фазово-некогерентных баллистических SnS-контактов показано сосуществование ниже T_c двух типов куперовских пар с анизотропией энергии связи в импульсном пространстве и расширенным s-волновым типом симметрии. Напрямую определены амплитуды $|\Delta_{L,S}(0)|$, характеристические отношения $2|\Delta_{L,S}(0)|/k_BT_c$ и температурные зависимости $|\Delta_{L,S}(T)|$. Показано примерное постоянство степени анизотропии обеих сверхпроводящих щелей с температурой вплоть до T_c.

В **Главе 5** рассмотрены данные туннельной и андреевской спектроскопии образцов семейства 1144: поликристаллов немагнитного соединения $CaKFe_4As_4$ и монокристаллов магнитного пниктида $EuCsFe_4As_4$. Показана анизотропия большой сверхпроводящей щели. Методами андреевской спектроскопии напрямую определены амплитуды, характеристические отношения и температурные зависимости сверхпроводящих параметров порядка. Показано, что полученная температурная зависимость критического тока зерен $I_c(T)/I_c(0)$ в $CaKFe_4As_4$ описывается формулой теории БКШ в двухзонном приближении с использованием значений $2|\Delta_{L,S}(0)|/k_BT_c$, определенных с помощью

андреевской спектроскопии, что демонстрирует согласованность двух методов. Также продемонстрирована возможность получения температурной зависимости критического тока межзеренных границ с помощью техники планарного контакта на микротрещине, важная для практических применений поликристаллических сверхпроводниковых материалов.

Глава 6 имеет обобщающий характер: приведены зависимости амплитуд и характеристических отношений сверхпроводящих щелей в исследованных материалах при изменении T_c. Показано сходство сверхпроводящих свойств селенидов с тремя выбранными типами изовалентного замещения, а также сверхпроводящей щелевой структуры пниктидов родственных семейств $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$, $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$. Продемонстрировано отсутствие влияния ферромагнетизма в подрешетке Eu^{2+} на температурные зависимости микроскопических сверхпроводящих параметров порядка $EuCsFe_4As_4$. В рамках двухзонной модели БКШ-типа с поправками сильной связи в обеих эффективных зонах показана реализация межзонного взаимодействия в $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ и наиболее сильной внутризонной связи в пниктидах $CaKFe_4As_4$.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. Список литературы соответствует тематике работы и отражает современное состояние исследований.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы, основным результатам и выводам.

Научная обоснованность положений, выносимых на защиту, и выводов диссертационного исследования несомненна и обеспечена глубиной анализа литературы по теме работы, уверенным владением автором экспериментальными методами туннельной спектроскопии, их доказанной применимостью к исследованным образцам.

Достоверность результатов и выводов базируется на применении комплекса трех взаимодополняющих методов (андреевской и туннельной спектроскопии, анализа температурной зависимости андреевского избыточного тока), статистической воспроизводимости результатов по данным исследования более 300 туннельных структур, соответствии их I(V) и dI/dV-характеристик теоретическим моделям, успешной апробацией на научных семинарах, российских и международных конференциях.

Результаты диссертации опубликованы в 18 статьях в рецензируемых периодических научных изданиях, индексируемых в Белом списке, международных базах

данных Web of Science и Scopus, и были представлены Т.Е. Кузьмичевой в 8 приглашенных, 11 устных и 10 стендовых докладах на профильных конференциях.

Наиболее интересными научно-значимыми результатами, полученными в работе, представляются:

1. Реализация однощелевой сверхпроводимости в селенидах железа $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$: наличие куперовских пар с единственной энергией связи $|\Delta|$, характеристическим отношением $2|\Delta(0)|/k_BT_c \approx 4.1–4.6$ и сильной связью, ее однозонной БКШ-образной температурной зависимостью $|\Delta(T)|$ и s-волновым типом симметрии.

2. Реализация анизотропии большой и малой сверхпроводящих щелей в k-пространстве без точек нулей и сходство щелевой структуры пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ недо- и передопированных составов. Показано, что напрямую измеренные температурные зависимости $|\Delta_{L,S}(T)|$ соответствуют случаю умеренного межзонного взаимодействия.

3. Показано сходство щелевой структуры немагнитного $CaKFe_4As_4$ и магнитного $EuCsFe_4As_4$ пниктидов семейства 1144, реализация двухщелевой сверхпроводимости с анизотропной в k-пространстве большой сверхпроводящей щелью без точек нулей. Показано, что напрямую измеренные температурные зависимости $|\Delta_{L,S}(T)|$ соответствуют случаю относительно слабого межзонного взаимодействия.

4. Реализация дальнего ферромагнитного порядка в $EuCsFe_4As_4$ ниже T_c не оказывает влияние на щелевую структуру и механизм куперовского спаривания в $EuCsFe_4As_4$.

5. В селенидах $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ показан скейлинг единственной сверхпроводящей щели $|\Delta(0)|$ и T_c в диапазоне критических температур 23–33 К, что указывает на сходство механизма куперовского спаривания данных соединений.

6. Показана единая эволюция щелевой структура пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$, $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$ семейств 122 и 1144 с критической температурой и скейлинг амплитуд обеих сверхпроводящих щелей с T_c в диапазоне $T_c \approx 11–36$ К. В рамках расширенной двухзонной модели БКШ-типа показана реализация сильной внутризонной связи в зонах с большой щелью в $CaKFe_4As_4$, в то время как в остальных исследованных пниктидах «собственное» характеристическое отношение (определяемое внутризонной константой связи λ_{LL}) близко к БКШ-пределу слабой связи 3.5.

Замечания по работе

1. В настоящее время одним из интересных направлений в физике конденсированного состояния является исследование структур сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник. Ожидается, что в монокристаллах $EuCsFe_4As_4$ с ферромагнитным переходом ниже T_c при прохождении криогенного скола вдоль плоскостей европия возможно образование SFS-контактов, однако в диссертации упоминание SFS-режима полностью отсутствует. Например, в Главе 5 мог бы быть приведен анализ экспериментальных данных в рамках данного предположения, который, к сожалению, отсутствует.

2. Известно, что техника «контакт на микротрещине» обычно используется для создания джозефсоновских SIS-контактов (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник). Однако в диссертации не рассматриваются SIS-контакты с большой емкостью и нет анализа, который бы объяснил проблемы с получением таких контактов.

3. Следует отметить, что при исследовании фазово-когерентных ScS-контактов, I(V)-характеристики которых содержат сверхтоковую ветвь, не было проведено измерений во внешнем магнитном поле и при наличии внешнего излучения. Эти измерения дали бы возможность получить важную информацию о ступеньках Шапиро и фраунгоферовских осцилляциях в этих переходах. Кстати, ScS-контакта нет в списке сокращений на стр.271.

Отмеченные выше замечания носят рекомендательный характер и не ставят под сомнение основные результаты и выводы работы.

Диссертация Т.Е. Кузьмичевой характеризуется глубоким концептуальным подходом, масштабностью поставленных задач и строгой системностью изложения. Автор демонстрирует зрелый научно-методологический подход, позволивший получить прямые достоверные результаты и установить фундаментальные закономерности изменения основных параметров сверхпроводящего состояния от вариации состава и критической температуры. Текст работы написан ясным, логически выверенным и академически строгим языком, что существенно облегчает понимание авторской концепции и аргументации.

Заключение

Диссертационная работа Кузьмичевой Татьяны Евгеньевны «Сверхпроводящий параметр порядка пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации

№ 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Кузьмичева Татьяна Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Международной межправительственной научно-исследовательской организации
Объединенный институт ядерных исследований
Шукринов Юрий Маджнунович

27.10.2026 г.

Контактные данные:
Тел.: +7-496-216-38-44, +7977-179-59-31
e-mail: shukrinv@theor.jinr.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация, — **01.04.02** «Теоретическая физика».
Адрес места работы: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

Подпись д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Ю.М. Шукринова заверяю:
Ученый секретарь Лаборатории теоретической физики Международной межправительственной научно-исследовательской организации Объединенный институт ядерных исследований,
Кандидат физико-математических наук,
Андреев Александр Васильевич

Список основных публикаций официального оппонента д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Ю.М. Шукринова по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. M. Nashaat and Yu. M. Shukrinov, Originality of resonance and locking phenomena in an SFS $\phi 0$ Josephson junction // Phys. Rev. B.— 2026.— Vol. 113.— P. 134519.
2. K. Kulikov, J. Teki´c, E. Kovalenko, M. Nashaat, T. A. Belgibayev, and Yu. M. Shukrinov Driven anomalous superconductor-ferromagnet-superconductor Josephson junctions: When steps are not Shapiro // Phys. Rev. B.— 2026.— Vol. 113.— P. 104520.
3. I. R. Rahmonov, Yu. M. Shukrinov, O. A. Kibardina, S. A. Abdelmoneim, Resonant control of magnetization in a shunted $\phi 0$ junction with LC circuit, // Appl. Phys. Lett. - 2025 – Vol. 126 - 232603
4. M. Nashaat, J. Tekić, and Yu. M. Shukrinov. Intrinsic space-time crystalline order in a hybrid Josephson junction. // Phys. Rev. B – 2025 - Vol. 112, - 184507
5. M. Sameh, Yu. M. Shukrinov, A. Y. Ellithi, Th. M. El-Sherbini,† and M. Nashaat. Locking of magnetic moment precession in a nanomagnet coupled to a Josephson junction under external radiation, // J. Phys.: Condens. Matter– 2025 – Vol. 37 - 235803.
6. Ю. М. Шукринов, М. Нашаат, Эсраа Таха, В. В. Рязанов, Стабилизация прецессии намагниченности в SFS $\varphi 0$ переходе в области ферромагнитного резонанса. // Письма в ЖЭТФ // - 2025 - Vol. 122, - 848.
7. Mazanik A.A., Botha A.E., Rahmonov I.R., Shukrinov Yu.M. Hysteresis and chaos in anomalous Josephson junctions without capacitance // Phys. Rev. Appl.— 2024.— Vol. 22.— P. 014062.
8. Shukrinov Yu.M., Kovalenko E., Teki´c J., Kulikov K., Nashaat M. Buzdin, shapiro, and chimera steps in ϕ_0 Josephson junctions // Phys. Rev. B.— 2024.— Vol. 109.—P. 024511.
9. Nashaat M., Kovalenko E., Shukrinov Yu.M. Buzdin, shapiro, and chimera steps in ϕ_0 Josephson junctions. II. Bifurcation, switching, and hysteresis // Phys. Rev. B.— 2024.— Vol. 110.— P. 024510.
10. Kulikov K.V., Anghel D.V., Nashaat, M., Dolineanu M., Sameh M., Shukrinov Yu.M. Resonance phenomena in a nanomagnet coupled to a Josephson junction under external periodic drive // Phys. Rev. B.— 2024.— Vol. 109.— P. 014429.
11. Botha A.E., Shukrinov Yu.M., Teki´c J., Kolahchi M.R. Chaotic dynamics from coupled magnetic monodomain and Josephson current // Phys. Rev. E.— 2023.— Vol. 107.— P. 024205.
12. Pourkarimi M.R., Haddadi S., Nashaat M., Kulikov K.V., Shukrinov Yu.M. Thermal local quantum uncertainty in a two-qubit-superconducting system under decoherence // Alexandria Engineering Journal.— 2023.— Vol. 83.— P. 27–34.

13. Abdelmoneim S.A., Shukrinov Yu.M., Kulikov K.V., ElSamman H., Nashaat M. Locking of magnetization and Josephson oscillations at ferromagnetic resonance in a ϕ_0 junction under external radiation // Phys. Rev. B.— 2022.— Vol. 106.— P. 014505.

14. Kulikov K.V., Anghel D.V., Preda A.T., Nashaat M., Sameh M., Shukrinov Yu.M. Kapitza pendulum effects in a Josephson junction coupled to a nanomagnet under external periodic drive // Phys. Rev. B.— 2022.— Vol. 105.— P. 094421.

15. Shukrinov Yu. M. Anomalous Josephson effect, // Phys. Usp. – 2022- Vol. 65 (4) – P. 317.