ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе **Кузьмичевой Татьяны Евгеньевны**

«Сверхпроводящий параметр порядка пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144»,

представленной на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Т.Е. Кузьмичевой посвящена экспериментальному исследованию микроскопической структуры сверхпроводящего (СП) параметра порядка в железосодержащих сверхпроводниках — пниктидах и халькогенидах семейств 122 и 1144. Несмотря на то, что с момента открытия сверхпроводимости в железосодержащих соединениях прошло более 15 лет, вопрос о числе СП-щелей, их амплитудах, симметрии и анизотропии в k-пространстве, а также об эволюции этих характеристик вдоль фазовой диаграммы допирования до сих пор остаётся дискуссионным. Особенно это касается электронно-допированных пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ (BFNA), передопированных составов, стехиометрических пниктидов семейства 1144 ($CaKFe_4As_4$, $EuCsFe_4As_4$) и феррохалькогенидов $A_xFe_{2-y}Se_2$ с различными типами изовалентного замещения. В качестве методов исследования использовались спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО) и туннельная спектроскопии планарных механически регулируемых папоконтактов на микротрещине.

Актуальность работы определяется как фундаментальной значимостью установления механизма куперовского спаривания в неклассических сверхпроводниках на основе железа, так и практической потребностью в надёжных данных о СП-щелевой структуре для развития сильноточных применений и создания ВТСП-устройств на основе этих материалов. Существующие литературные данные о СП-щелевой структуре семейств 122 и 1144 довольно противоречивы: значения характеристических отношений $2\Delta(0)/k_BT_c$, полученные разными методами, различаются в несколько раз, а для ряда составов (передопированные BFNA, $EuCsFe_4As_4$, феррохалькогениды с изовалентным замещением) прямые систематические измерения вообще отсутствовали. В этой связи выполненное автором комплексное исследование, основанное на прямом мето-

де ЭНМАО SnS-контактов на микротрещине, представляется своевременным и весьма актуальным.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 417 наименований. Полный объём работы — 298 страниц, включая 116 рисунков и 7 таблиц.

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

Глава 1 носит обзорный характер. В ней подробно рассмотрены кристаллическая и зонная структура, фазовые диаграммы пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144, обсуждаются особенности нематической фазы, волны спиновой плотности, поверхности Ферми и орбитального строения зон. Приведён критический анализ существующих теоретических моделей куперовского спаривания ($s_{\pm}$, s_{++}, d-волновой, (s+is), (s+id)) и экспериментальных данных о СП-щелевой структуре, полученных методами ARPES, СТС, ИК и ТГц - спектроскопии, измерений теплоёмкости и глубины проникновения. Показано, что литературные данные о числе СП-щелей и величинах характеристических отношений достаточно противоречивы, а для ряда исследованных в диссертации составов прямые измерения вообще отсутствуют. Обоснована необходимость применения метода ЭНМАО – спектроскопии SnS-контактов для прямого определения СП-щелевой структуры.

Глава 2 посвящена описанию экспериментальных методов и теоретических моделей, использованных в работе. Подробно изложена теория эффекта андреевского отражения и эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО) в SnS-контактах, рассмотрены соответсвующие теоретические модели. Описана техника создания планарных механически регулируемых контактов на микротрещине (ПМРКМ) в моно- и поликристаллах слоистых соединений, приведены схемы измерительной установки и методика измерения $I(V)$ и $dI(V)/dV$-характеристик. Изложена двухзонная модель Москаленко – Сула с поправками сильной связи, использованная для аппроксимации температурных зависимостей СП-щелей. Приведены характеристики исследованных образцов (BFNA, $CaKFe_4As_4$, $EuCsFe_4As_4$, KNFS, KFSS, NKRFS) и данные их первичной аттестации.

В **главе 3** представлены результаты ЭНМАО-спектроскопии феррохалькогенидов

$(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$ (KNFS), $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ (KFSS) и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ (NKRFS). На основе анализа субгармонической щелевой структуры (СГС) на $dI(V)/dV$-спектрах стопочных SnS-контактов определены амплитуды СП-щели и температурные зависимости $|\Delta(T)|$. Показано, что в каждом из исследованных соединений при $T \geq 4.2$ K реализуется единственный микроскопический СП-параметр порядка $|\Delta|$ с s-волновой симметрией. Отсутствие второй (малой) СП-щели подтверждено независимо по температурным зависимостям андреевского избыточного тока $I_{\rm exc}(T)$ и сверхтока $I_c(T)$ фазово-когерентных ScS-контактов. Установлено, что характеристическое отношение $2|\Delta(0)|/k_BT_c \approx 4.35 \pm 0.25$ превышает БКШ-предел слабой связи 3.53 и практически не меняется в диапазоне $T_c \approx 23$–33 K. Показано, что положение особенности $V_{\rm foot}$ при малых смещениях не связано с гипотетической второй СП-щелью, а описывает свойства SnS-контакта.

Глава 4 посвящена исследованию пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ с электронным замещением в широком диапазоне допирования ($x \approx 0.08$–0.14), включая недо-, оптимально и передопированные составы. На $dI(V)/dV$-спектрах стопочных SnS-контактов воспроизводимо наблюдается дублетная структура андреевских особенностей, интерпретированная как проявление анизотропии СП-щели в k-пространстве. Прямо определены экстремумы углового распределения большой ($\Delta_L^{\rm out}, \Delta_L^{\rm in}$) и малой ($\Delta_S^{\rm out}, \Delta_S^{\rm in}$) СП-щелей, их температурные зависимости и степень анизотропии. Показано, что в недо- и передопированной областях фазовой диаграммы СП-щелевая структура совпадает, а степень анизотропии не увеличивается в сильно передопированных составах. Установлено, что оба СП-конденсата находятся в пределе слабой связи, а отношение силы внутризонного и межзонного взаимодействий растёт с увеличением T_c.

В **главе 5** представлены результаты исследования стехиометрических пниктидов $CaKFe_4As_4$ (немагнитного) и $EuCsFe_4As_4$ (с магнитным упорядочением в подрешётке Eu^{2+} при $T_m \approx 15$ K $< T_c$). Методом ЭНМАО-спектроскопии SnS-контактов и туннельной спектроскопии ScS-контактов определены амплитуды большой и малой СП-щелей, их температурные зависимости и степень анизотропии большой СП-щели. Показано, что в обоих соединениях реализуется двухщелевая сверхпроводимость с анизотропной большой СП-щелью расширенного s-волнового типа без точек нулей. Установлено, что магнитный переход в подрешётке Eu^{2+} при $T_m \approx 15$ K не влияет на температурные зависимости СП-щелей и, следовательно, на механизм куперовского спаривания. На основе анализа температурных зависимостей сверхтока гибридных ScS–SnS-структур

определены характеристики «объёмного» и «поверхностного» (наведённого на межзеренных границах) СП-параметров порядка.

Глава 6 носит обобщающий характер. Проведено сравнение СП-щелевой структуры всех исследованных соединений. Показано, что в феррохалькогенидах KNFS, KFSS и NKRFS реализуется однощелевая сверхпроводимость с сильной связью и $2|\Delta(0)|/k_BT_c \approx \text{const}$ в диапазоне $T_c \approx 23$–33 K. Установлено, что в пниктидах $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$, $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$ реализуется единая эволюция СП-щелевой структуры с T_c: характеристические отношения экстремумов большой и малой СП-щелей практически не меняются в диапазоне $T_c \approx 10$–36.5 K. Показано, что степень анизотропии большой СП-щели $A_L \approx 25$–43% близка для всех исследованных пниктидов и не зависит от температуры. На основе анализа параметров двухзонной модели установлено, что отношение силы внутризонного и межзонного взаимодействий растёт с увеличением T_c, а «собственное» характеристическое отношение большой СП-щели в $CaKFe_4As_4$ превышает БКШ-предел слабой связи, соответствуя силе связи в феррохалькогенидах.

В заключении к диссертации сформулированы основные результаты и выводы, перечисленные в виде девяти пунктов, которые соответствуют положениям, выносимым на защиту.

Диссертация представляет собой завершённое экспериментальное исследование, выполненное на высоком методическом уровне. Основные научные положения и выводы работы базируются на значительном объёме экспериментальных данных, полученных с использованием комплекса взаимодополняющих методик:

- спектроскопия ЭНМАО баллистических SnS-контактов, создаваемых с помощью техники планарного механически регулируемого контакта на микротрещине (ПМРКМ);
- туннельная спектроскопия фазово-когерентных ScS-контактов;
- анализ температурных зависимостей андреевского избыточного тока $I_{\text{exc}}(T)$;
- измерения температурных зависимостей сверхтока $I_c(T)$ гибридных ScS–SnS-структур;
- аппроксимация экспериментальных зависимостей СП-щелей в рамках двухзонной модели Москаленко–Сула с поправками сильной связи.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- воспроизводимостью данных на десятках контактов, созданных в различных образцах из одной закладки;
- согласованностью результатов, полученных независимыми методами (ЭНМАО-спектроскопия SnS-контактов, туннельная спектроскопия ScS-контактов, анализ $I_{\text{exc}}(T)$);
- разумным согласием с имеющимися литературными данными для родственных соединений (BFCA, $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$, $CaKFe_4As_4$ и др.) в тех случаях, где такие данные имеются;
- внутренней непротиворечивостью выводов о числе СП-щелей, их амплитудах и температурных зависимостях.

Сформулированные в диссертации положения, выносимые на защиту, достаточно полно обоснованы экспериментальным материалом. Выводы работы не вызывают принципиальных возражений и логично вытекают из представленных результатов.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений. В ней получен целый ряд новых и важных результатов по СП-щелевой структуре пниктидов и халькогенидов железа.

В частности впервые:

1. Проведено систематическое прямое определение СП-щелевой структуры пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ в широком диапазоне электронного допирования ($x \approx 0.08$–0.14), включая недо-, оптимально и передопированные составы.
2. Определена СП-щелевая структура стехиометрических пниктидов семейства 1144 — $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$, при этом для $EuCsFe_4As_4$ такие данные получены впервые.
3. Впервые исследована СП-щелевая структура феррохалькогенидов $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ с различными типами изовалентного замещения и показана реализация однощелевой сверхпроводимости.
4. Установлена единая эволюция СП-щелевой структуры пниктидов семейств 122 и 1144 с критической температурой: показано, что характеристические отношения

$2\Delta(0)/k_BT_c$ для экстремумов большой и малой СП-щелей практически не меняются в диапазоне $T_c \approx 10$–36.5 K.

5. Показано, что магнитное упорядочение в подрешётке Eu^{2+} при $T_m \approx 15$ K $< T_c$ не влияет на температурные зависимости СП-щелей и, следовательно, на механизм куперовского спаривания в $EuCsFe_4As_4$.

6. В рамках двухзонной модели Москаленко–Сула с поправками сильной связи оценены силы внутризонного и межзонного взаимодействий и показано, что отношение этих сил растёт с увеличением T_c.

Новизна результатов подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых журналах (Physical Review B, Письма в ЖЭТФ, УФН, Физика твёрдого тела, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism и др.) и апробацией на многочисленных российских и международных конференциях.

Фундаментальная значимость работы состоит в том, что полученные данные позволяют существенно продвинуться в понимании природы куперовского спаривания в железосодержащих сверхпроводниках. Установление факта реализации анизотропной (расширенной s-волновой) СП-щели без точек нулей в пниктидах семейств 122 и 1144, а также однощелевой сверхпроводимости в исследованных феррохалькогенидах, является важным вкладом в решение проблемы симметрии СП-параметра порядка в этих материалах.

Практическая значимость работы связана с тем, что полученные данные о характеристических отношениях, амплитудах и температурных зависимостях СП-щелей могут быть использованы для:

- интерпретации данных объёмных методов (теплоёмкость, глубина проникновения, теплопроводность, оптическая спектроскопия);
- развития теоретических моделей куперовского спаривания в многозонных сверхпроводниках;
- оценки температурного диапазона использования исследованных материалов в сильноточных применениях (на основе анализа температурных зависимостей сверхтока межзеренных границ).

При общей высокой оценке работы необходимо сделать ряд замечаний и задать некоторые вопросы:

1. Интерпретируя свои экспериментальные результаты автор, в основном, использует модифицированную *двухзонную модель* Москаленко–Сула. В тоже время, из многочисленных расчетов электронных спектров рассматриваемых систем хорошо известно, что для них чаще всего характерно наличие *трех* цилиндрических поверхностей Ферми. При этом на отдельных цилиндрах естественным образом в общем случае могут возникать *три* сверхпроводящих щели. Имеется много ARPES экспериментов, подтверждающих именно такую структуру спектра и наличие именно трех СП-щелей. В каком соотношении результаты автора, показывающие наличие только двух таких щелей, находятся с этими работами. Можно – ли утверждать, что в изученных системах однозначно имеется только две щели? Соответственно, не следовало – ли автору провести сравнение своих данных с трехзонными моделями электронной структуры? В сущности, это не столь уж трудно сделать, по сравнению с упрощенной моделью Москаленко – Сула.

2. Автор достаточно убедительно показывает, что в исследованных феррохалькогенидах реализуется однощелевая сверхпроводимость с единственным СП-параметром порядка. Однако в литературе для родственных соединений ($K_xFe_{2-y}Se_2$ других составов) сообщалось о наблюдении второй СП-щели. В чем состоят возможные причины такого расхождения: связано ли это с различием составов, с особенностями поверхности Ферми, или с методическими ограничениями ЭНМАО-спектроскопии?

3. Автор интерпретирует дублетную структуру андреевских особенностей как проявление анизотропии СП-щели в k-пространстве, а не как две независимые СП-щели на разных листах поверхности Ферми. Приведённые аргументы (схожесть температурных зависимостей, постоянство отношения $\Delta_{\text{out}}/\Delta_{\text{in}}$, аналогичное поведение в разных семействах) выглядят достаточно убедительно. Тем не менее, хотелось бы понять, насколько однозначно можно различить эти два сценария на основе имеющихся экспериментальных данных, и какие дополнительные эксперименты могли бы помочь в решении этого вопроса.

4. В $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$ дублетный характер андреевских особенностей от малой СП-щели воспроизводимо не наблюдался, и автор оценивает лишь эффективную амплитуду Δ_S. Связано ли это с сильной анизотропией Δ_S, с малой амплитудой соответствующих особенностей, или с методическими трудностями?

5. В работе проведено сравнение полученных результатов с литературными данными ARPES, СТС, ИК спектроскопии, оптических измерений, измерений теплоёмкости и глубины проникновения. Это сравнение показывает, что результаты ЭНМАО – спектроскопии в целом согласуются с данными объёмных методов, но в ряде случаев наблюдаются определенные расхождения. Хотелось бы более детального обсуждения причин этих расхождений и того, какие из методов являются наиболее надёжными для определения СП-щелевой структуры в железосодержащих сверхпроводниках.

Разумеется, эти вопросы не умаляют достижений автора, а скорее стимулируют проведение новых исследований. В диссертации приведены результаты впечатляющих экспериментальных исследования в весьма актульной и очень сложной области современной физики конденсированного состояния и получены совершенно уникальные и новые результаты. Без всякой переоценки можно сказать, что эти исследования выполнены на мировом уровне, а их автор относится к числу лидеров в этой области.

Резюмируя, нужно сказать, что диссертационная работа Т.Е. Кузьмичевой «Сверхпроводящий параметр порядка пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144» представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Работа содержит решение важной научной проблемы — установления структуры микроскопического СП-параметра порядка и её эволюции с критической температурой и допированием в железосодержащих сверхпроводниках семейств 122 и 1144.

Основные результаты работы опубликованы в 18 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, и апробированы на 29 российских и международных конференциях (включая 8 приглашенных докладов).

Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния (физико-математические науки) и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года

Считаю, что ***Кузьмичева Татьяна Евгеньевна*** вполне заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:
академик РАН, доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
лаборатории теоретической физики
Института электрофизики Уральского отделения РАН
Садовский Михаил Виссарионович

15.10.2026 г.

Контактные данные:
Тел.: +7-343-267-87-86
e-mail: sadovski@iep.uran.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация, — 01.04.02 «Теоретическая физика».
Адрес места работы: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106.

Подпись академика РАН, д.ф.-м.н., профессора М.В. Садовского заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,
кандидат физ.-мат. наук Кокорина Е.Е.

Список основных публикаций официального оппонента академика РАН, доктора физико-математических наук, профессора М.В. Садовского по тематике диссертации Т.Е. Кузьмичевой «Сверхпроводящий параметр порядка пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144» за последние 5 лет

1. М.В. Садовский. Иллюзия планковской релаксации в металлах. УФН т. 191, № 2, 182 (2021).
2. М.В. Садовский. Температура сверхпроводящего перехода для очень сильной связи в антиадиабатическом пределе уравнений Элиашберга. Письма ЖЭТФ т. 118, 800 (2021).
3. М.В. Садовский. Границы применимости теории Элиашберга и ограничения на температуру сверхпроводящего перехода. УФН т. 192, 773 (2022).
4. М.В. Садовский. Верхняя граница температуры сверхпроводящего перехода в теории Элиашберга — МакМиллана. Письма ЖЭТФ т. 120, 214 (2024).
5. M.V. Sadovskii. Upper limit for superconducting transition temperature in electron — phonon superconductors: very strong coupling. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism v. 38, art. no, 234 (2025).