

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Кузьмичева Татьяна Евгеньевна

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПАРАМЕТР ПОРЯДКА ПНИКТИДОВ И
ХАЛЬКОГЕНИДОВ ЖЕЛЕЗА СЕМЕЙСТВ 122 И 1144**

Специальность — 1.3.8

Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Официальные оппоненты: **Садовский Михаил Виссарионович**

академик РАН, доктор физико-математических наук, Институт электрофизики Уральского отделения РАН, главный научный сотрудник

Панкратов Андрей Леонидович

доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН, ведущий научный сотрудник

Шукринов Юрий Маджнунович

доктор физико-математических наук, Объединенный институт ядерных исследований, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН»**

Защита состоится «16» ноября 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.262.01

доктор физико-математических наук

Золотько Александр Степанович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

История исследования неклассических сверхпроводников на основе железа начинается с открытия в 2006 году соединения $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeP}$ [1], переходящего в сверхпроводящее (СП) состояние при критической температуре $T_c \approx 4$ К. Несмотря на фундаментальную важность открытия сверхпроводимости в материале, содержащем магнитные атомы, из-за довольно низкой T_c большинство исследователей не придали особого значения этой работе. Однако, двумя годами позже было показано [2], что в аналогичном материале $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ T_c достигает значения 28 К, сравнимого с критическими температурами таких неклассических сверхпроводников как MgB_2 ($T_c \approx 40$ К [3]) и $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ($T_c \approx 30$ К [4]). Именно сообщение [2] произвело настоящий «бум» в физике твердого тела [5–7], сравнимый с открытием высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) купратов [4]. На данный момент синтезировано более 10 семейств СП-пниктидов и халькогенидов железа с максимальными $T_c \approx 57$ К в объемных кристаллах [8] и $T_c \approx 100$ К в монослое FeSe [9]. Эти соединения завоевали неподдельный интерес исследователей: начиная с 2008 года, опубликовано несколько десятков тысяч статей в ведущих научных журналах, посвященных многим аспектам свойств железосодержащих сверхпроводников.

Среди железосодержащих сверхпроводников пниктиды и халькогениды семейств 122 и 1144 с общей формулой родительских соединений $Ae\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($Ae = \text{Ba}, \text{Eu}, \text{K}, \text{Sr}, \text{Cs}, \text{Rb}$, т.н. семейство Ba-122) [10], $X\text{YFe}_4\text{As}_4$ ($X = \text{Ca}, \text{Eu}, \text{Sr}, Y = \text{K}, \text{Cs}, \text{Rb}$, семейство 1144) [11], $A\text{Fe}_2\text{Se}_2$ ($A = \text{Na}, \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}, \text{Tl}$, семейство 122-Se) [12] представляются весьма интересными как с фундаментальной точки зрения, так и для различных прикладных применений. С одной стороны, благодаря умеренным критическим температурам, достигающим $T_c \approx 38$ К [10], а также чрезвычайно высоким значениям верхнего критического поля $H_{c2}(0) \sim 100$ Тл и плотности «собственного» критического тока $J_c(0) \sim 10^7\text{--}10^8$ А/см² [13,14] железосодержащие сверхпроводники семейств 122 и 1144 уже сейчас активно используются как база для

сильноточных устройств и ВТСП-соленоидов. С другой стороны, богатая фазовая диаграмма допирования, многозонный и многоорбитальный характер электронного спектра, возможное взаимодействие СП, магнитной и нематической фаз [15] открывает перспективы новой физики, в частности, установления новых типов куперовского спаривания и механизмов ВТСП-состояния [16,17]. Вместе с тем, детальное рассмотрение механизма неклассической сверхпроводимости пниктидов и селенидов семейств 122 и 1144 требуют достоверных экспериментальных данных о структуре микроскопического СП-параметра порядка и их эволюции при изменении состава и степени замещения. На данный момент подобные прямые систематические исследования в мировой литературе отсутствуют.

Объект исследования

В работе исследованы пниктиды $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с электронным замещением недодопированных ($x \approx 0.08$, $T_c \approx 18$ К), оптимально допированных ($x \approx 0.1$, $T_c \approx 20$ К) и передопированных составов ($x \approx 0.12-0.14$, $T_c \approx 18-12$ К); пниктиды семейства 1144 стехиометрического состава с дырочным «самодопированием» — $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ с $T_c \approx 35-37$ К, имеющий магнитный переход в подрешетке Eu^{2+} ниже T_c , и немагнитный $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$, а также феррохалькогениды с тремя типами изовалентных замещений — $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ с $T_c \approx 30$ К, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ с $T_c \approx 27$ К и $(\text{K}_{0.3}\text{Na}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ с $T_c \approx 33$ К.

Целями диссертационной работы являются:

- определение и сравнение СП-щелевой структуры пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ ($x = 0.08-0.14$), $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ и селенидов железа $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ и $(\text{K}_{0.3}\text{Na}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ структурного типа 122 и ее эволюции с T_c и допированием для каждого класса сверхпроводников;
- определение влияния вида допирования (электронного, дырочного) и изовалентного замещения на структуру СП-параметра порядка железосодержащих сверхпроводников семейств Ва-122, 1144, 122-Se;
- определение влияния ферромагнитного порядка подрешетки Eu^{2+} , который устанавливается ниже T_c в $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, на энергетические характеристики СП-

конденсатов.

Для достижения данных целей были решены следующие **задачи**:

- Прямое определение количества, амплитуд $|\Delta(0)|$ и характеристических отношений $2|\Delta(0)|/k_B T_c$ микроскопических СП-параметров порядка рассматриваемых соединений методами спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО) баллистических контактов типа сверхпроводник-тонкий нормальный металл-сверхпроводник (SnS).
- Анализ формы андреевских особенностей на $dI(V)/dV$ -спектрах SnS-контактов в рамках имеющихся теоретических моделей, оценка типа симметрии СП-щелей и степени их анизотропии.
- Прямое определение температурных зависимостей СП-щелей $|\Delta_i(T)|$ и андреевского избыточного тока $I_{exc}(T)$, их аппроксимация имеющимися теоретическими моделями. Установление однозначности аппроксимации зависимостей $|\Delta_i(T)|$ и оценки сил внутризонного и межзонного взаимодействий.
- Измерение температурной зависимости концентрации куперовских пар $n_S(T)$, ее аппроксимация в рамках имеющихся теоретических моделей с использованием температурных зависимостей СП-щелей $|\Delta_i(T)|$, полученных напрямую методами ЭНМАО-спектроскопии. Проверка согласованности использованных спектроскопических методик.
- Сравнение СП-щелевой структуры и температурных зависимостей СП-щелей недо- и передопированных пниктидов $Ba(Fe,Ni)_2As_2$ с близкими T_c ; в пниктиде $EuCsFe_4As_4$ с магнитным переходом ниже T_c и немагнитном $CaKFe_4As_4$; в ферроселенидах $K_xFe_{2-y}(Se,S)_2$, $(K,Na)_xFe_{2-y}Se_2$, $(Na,K,Rb)_xFe_{2-y}Se_2$ с различными типами изо-валентного замещения. Определение зависимостей характеристических отношений теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) $2\Delta_i(0)/k_B T_c$ СП-щелей и степени их анизотропии вдоль фазовой диаграммы допирования в рассматриваемых соединениях.

Степень разработанности темы

Несмотря на активные исследования в течение 17 лет, данные литературы о СП-щелевой структуре пниктидов и халькогенидов семейства 122 крайне

противоречивы. До сих пор не установлено единое мнение о количестве и типе симметрии СП-щелей, а величины такого базового параметра как характеристическое отношение большой СП-щели $2\Delta_L(0)/k_B T_c$, полученные в литературе для пниктидов семейств 122 и 1144 и халькогенидов семейства 122-Se как различными, так и одинаковыми методами для аналогичных соединений, различаются до 3–4 раз.

Вместе с тем, рассматриваемые в диссертации составы ферропниктидов и селенидов относительно малоизучены. Для пниктидов семейства $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ на данный момент экспериментальные исследования СП-щелевой структуры проведены только в узком диапазоне $x \approx 0.08-0.1$ слабо недодопированной области фазовой диаграммы; определение эволюции СП-параметра порядка при вариации электронного допирования и сравнение СП-щелевой структуры недо- и передопированных составов в литературе отсутствуют [18]. СП-щелевая структура пниктидов $EuCsFe_4As_4$ и 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 $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ не была исследована другими группами. Сравнение энергетических параметров СП-состояния пниктидов семейства 1144 на основе европия (с магнитным переходом ниже T_c) и немагнитных родственных соединений, определенных одним и тем же методом, также отсутствует в литературе.

Научная новизна диссертационного исследования

Проведенное прямое систематическое определение амплитуд, характеристических отношений и температурных зависимостей СП-параметров порядка пниктидов семейств 122 и 1144 и халькогенидов семейства 122-Se вышеуказанных составов не имеет аналогов в мировой литературе. Следующие результаты получены впервые:

- определена СП-щелевая структура пниктидов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ передопированных составов с $x = 0.12-0.14$, $EuCsFe_4As_4$, $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$ и $(K_{0.3}Na_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$;
- проведено сравнение свойств СП-подсистемы $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ недо- и передопированных составов в диапазоне степени электронного замещения $x = 0.08-0.14$;
- проведено сравнение свойств СП-подсистемы немагнитного пниктида $CaKFe_4As_4$

и соединения $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ с ферромагнитным упорядочением ниже T_c ; показано, что последнее не оказывает существенного влияния на механизм куперовского спаривания и СП-щелевую структуру этих материалов;

- оценена степень анизотропии большой и малой СП-щели в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ ($x = 0.08-0.14$), степень анизотропии большой СП-щели в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ и показана реализация расширенного s -волнового типа симметрии СП-параметра порядка без точек нулей;

- напрямую измерены температурные зависимости СП-щели в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ ($x = 0.08-0.14$), $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$, $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ и $(\text{K}_{0.3}\text{Na}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$;

- в рамках двухзонной модели на основе уравнений Москаленко и Сула с поправками сильной связи в двух эффективных зонах оценена сила внутризонной и межзонной связи в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ ($x = 0.08-0.14$), $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$, $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ и ее эволюция с T_c .

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе фундаментальные закономерности структуры СП-параметра порядка пниктидов и халькогенидов семейств 122 и 1144 и его эволюции при электронном, дырочном допировании и изовалентном замещении важны для верификации теоретических моделей, описывающих механизм неклассической сверхпроводимости этих материалов, а также для выявления сходства и различий в таких механизмах для различных железосодержащих сверхпроводников. В свою очередь, понимание фундаментальных механизмов может способствовать оптимизации СП-свойств железосодержащих сверхпроводников семейств 122 и 1144 и увеличению их критических параметров, а также открыть пути создания новых ВТСП для широкого спектра прикладных задач.

Методология и методы исследования

СП-щелевая структура пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144 исследовалась с помощью методов туннельной спектроскопии баллистических SnS-контактов, а также ScS-структур (сверхпроводник-сужение-сверхпроводник),

которые создавались в моно- и поликристаллических СП-образцах с помощью техники планарного механически регулируемого контакта на микротрещине «break-junction» (ПМРКМ).

Для прямого определения количества, амплитуд $|\Delta(0)|$, характеристических отношений $2|\Delta(0)|/k_B T_c$ и температурных зависимостей СП-щелей $|\Delta(T)|$, а также оценки типа их симметрии и степени анизотропии в импульсном пространстве был использован метод ЭНМАО-спектроскопии SnS-контактов. С целью проверки самосогласованности полученных данных $|\Delta(T)|$ и $2|\Delta(0)|/k_B T_c$ проведены измерения и анализ температурной зависимости андреевского избыточного тока $I_{exc}(T)$ SnS-контактов. Температурная зависимость макроскопического СП-параметра порядка — концентрации куперовских пар $n_S(T)/n_S(0)$ — определялась на основе измеренной температурной зависимости сверхтока $I_c(T)$ ScS-структур.

Оценка сил внутризонного и межзонного взаимодействий проводилась с помощью аппроксимации температурных зависимостей СП-щелей $\Delta_L(T)$ и $\Delta_S(T)$ в рамках модифицированного двухзонного подхода на основе уравнений Москаленко и Сула с поправками сильной связи в обеих эффективных зонах.

Положения, выносимые на защиту

1. Свойства СП-фазы феррохалькогенидов $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$, $(Na_{0.3}K_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ при $T \geq 4.2$ К описываются единственным микроскопическим СП-параметром порядка $|\Delta|$ и сильной связью электронов в куперовской паре. Температурная зависимость СП-щели $|\Delta(T)|$ описывается однозонной БКШ-образной функцией.

2. В феррохалькогенидах $(K_{0.8}Na_{0.2})_{0.9}Fe_{1.7}Se_2$, $K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$, $(Na_{0.3}K_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$ характеристическое отношение СП-щели $2|\Delta(0)|/k_B T_c = 4.35 \pm 0.25$ совпадает и практически постоянно в диапазоне критических температур $T_c \approx 23\text{--}33$ К.

3. В пниктидах $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ недо-, оптимально и передопированных составов в диапазоне степени электронного замещения $x \approx 0.08\text{--}0.1\text{--}0.14$, соответственно, ниже T_c реализуется двухщелевая сверхпроводимость с анизотропными в k -

пространстве большой и малой СП-щелями, имеющими расширенный s -волновой тип симметрии без точек нулей). Характеристические отношения экстремальных амплитуд большой СП-щели (минимальной Δ_L^{in} и максимальной Δ_L^{out} энергии связи куперовских пар в зависимости от направления импульса) составляют $2|\Delta_L^{\text{out}}(0)|/k_B T_c = 5.75 \pm 0.45$, $2|\Delta_L^{\text{in}}(0)|/k_B T_c = 3.9 \pm 0.4$, степень анизотропии $A_L = 24\%–36\%$; для экстремумов малой СП-щели — $2|\Delta_S^{\text{out}}(0)|/k_B T_c = 1.9 \pm 0.4$, $2|\Delta_S^{\text{in}}(0)|/k_B T_c = 1.4 \pm 0.4$, $A_S = 20\%–39\%$. В недодопированной ($x \approx 0.08–0.10$) и передопированной ($x \approx 0.10–0.14$) области фазовой диаграммы СП-щелевая структура совпадает. В сильно передопированных составах с $x \approx 0.14$ степень анизотропии СП-щелей не увеличивается.

4. В пниктидах $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ реализуется двухщелевая сверхпроводимость с анизотропной в k -пространстве большой СП-щелью. В $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ характеристические отношения экстремумов углового распределения большой СП-щели составляют $2|\Delta_L^{\text{out}}(0)|/k_B T_c = 5.7 \pm 0.4$, $2|\Delta_L^{\text{in}}(0)|/k_B T_c = 3.6 \pm 0.3$, степень анизотропии $A_L = 31\%–41\%$; характеристическое отношение малой СП-щели — $2|\Delta_S(0)|/k_B T_c = 1.5 \pm 0.4$. Для $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$: $2|\Delta_L^{\text{out}}(0)|/k_B T_c = 5.3 \pm 0.4$, $2|\Delta_L^{\text{in}}(0)|/k_B T_c = 3.25 \pm 0.25$, степень анизотропии $A_L = 32\%–43\%$; характеристическое отношение малой СП-щели — $2|\Delta_S(0)|/k_B T_c = 1.3 \pm 0.2$.

5. Степень анизотропии большой СП-щели в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, большой и малой СП-щелей в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ в диапазоне $x \approx 0.08–0.14$ не зависит от температуры при $T < T_c$.

6. Установление дальнего ферромагнитного порядка в подрешетке Eu^{2+} при $T \approx 15 \text{ K} < T_c$ не влияет на температурные зависимости СП-щелей и, соответственно, на механизм куперовского спаривания в пниктидах $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$.

7. В пниктидах $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$, $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ реализуется единая эволюция СП-щелевой структуры при изменении T_c . Оба СП-конденсата в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ находятся в пределе слабой связи теории БКШ 3.53, внутризонное взаимодействие в зонах с большой СП-щелью в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ на $9\%–20\%$ превосходит предел слабой связи и соответствует силе связи в феррохалькогенидах

$(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$, $(\text{Na}_{0.3}\text{K}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$. Отношение силы внутризонного и межзонного взаимодействий в пниктидах $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$, $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ растёт с увеличением T_c .

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационное исследование энергетических параметров СП-конденсатов в пниктидах и селенидах железа семейств 122 и 1144 соответствует направлениям «Теоретическое и экспериментальное изучение свойств конденсированных веществ в экстремальном состоянии (сильное сжатие, ударные воздействия, сильные магнитные поля, изменение гравитационных полей, низкие и высокие температуры), фазовых переходов в них и их фазовых диаграмм состояния» и «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (отрасль науки — физико-математические).

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Для получения экспериментальных данных использовалась техника создания планарных механически регулируемых контактов на микротрещине, обладающая рядом преимуществ перед широко используемыми туннельными методиками. В частности, метод обеспечивает создание чистых криогенных сколов в исследуемом образце, эффективный теплоотвод от контактной области, четырехточечное подключение, а также способствует получению до сотни туннельных структур на одном и том же образце, способствуя набору значительной статистики данных о СП-щелевой структуре исследуемого материала. Метод ЭНМАО-спектроскопии SnS-контактов на микротрещине обладает высоким разрешением (относительная погрешность определения энергетических параметров — до $\pm 3\%$) и позволяет анализировать тонкую структуру $dI(V)/dV$ -спектров, вызванную, например, анизотропией СП-щелей в k -пространстве или резонансным взаимодействием с бозонными

модами. В качестве вспомогательных методов использовались анализ температурной зависимости андреевского избыточного тока SnS-контактов и туннельная спектроскопия фазово-когерентных ScS-контактов. Достоверность полученных сведений о структуре СП-параметра порядка подтверждается их воспроизводимостью и независимостью от свойств конкретного туннельного контакта.

Результаты представлены в 29 (8 приглашенных, 11 устных и 10 постерных) докладах на всероссийских и международных конференциях:

1. XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016», секция «Физика», Россия, Москва, 11–15 апреля 2016.
2. International workshop “Advances in preparation and investigation of emergent iron-based superconductors” (IBS-2016), Германия, Дрезден, 23–25 мая 2016.
3. Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Россия, Троицк, 3 июня 2016.
4. Международная конференция Physics in Quantum Matter Superconductivity, Magnetism & Ferroelectricity (Superstripes 2016), Италия, Искья, 23–29 июня 2016.
5. XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Россия, Москва, 8–11 ноября 2016.
6. MSU-IFW-ILTPE Joint Workshop “Synthesis, Theoretical Examination and Experimental Investigation of Emergent”, Россия, Москва, 14–17 июня 2017.
7. XV Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления» памяти бессменного председателя конференции академика Л.В. Келдыша, Россия, Троицк, 8 июня 2017.
8. 28th International Conference on Low Temperature Physics LT28, Швеция, Гетеборг, 9–16 августа 2017.
9. International Symposium “Perspectives of High-Temperature Superconductivity”, Россия, Москва, 23–25 октября 2017.
10. International Conference on Multi-Condensate Superconductivity and Superfluidity in Solids and Ultra-Cold Gases, Италия, Триест, 14–18 мая 2018.
11. XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и

- молодых ученых «Ломоносов-2020», Россия, Москва, 10–27 ноября 2020.
12. XIII Сибирский семинар по высокотемпературной сверхпроводимости и физике наноструктур ОКНО-2021, Россия, Новосибирск, 24–25 мая 2021.
 13. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021», Россия, Москва, 12–23 апреля 2021.
 14. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022», Россия, Москва, 11–22 апреля 2022.
 15. XIX Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Россия, Москва, 26 мая 2022.
 16. 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism ICSM2023, Турция, Олюдениз, 4–11 мая, 2023.
 17. Международная конференция 13th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS 2023), Турция, Олюдениз, 11–17 октября 2023.
 18. Международная конференция «39-е Совещание по физике низких температур (ФНТ 2024)», Россия, Черноголовка, 3–7 июня 2024.
 19. 9th International Conference on Superconductivity and Magnetism — ICSM2024, Турция, Олюдениз, 27 апреля – 4 мая 2024.
 20. Международная конференция 14th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS 2024), Турция, Олюдениз, 8–14 октября 2024.
 21. XXIX Симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника», Россия, Нижний Новгород, 10–14 марта 2025.
 22. XXII Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Россия, Москва, 22 мая 2025.
 23. Конференция «Современные сверхпроводящие материалы, технологии и устройства», Россия, Москва, 23 июля 2025.
 24. IV Международная Конференция «Физика конденсированных состояний» ФКС-2025, Россия, Черноголовка, 2–6 июня 2025.

25. 2nd International Workshop on Superconducting and Magnetic Hybrid Structures – 2025, Россия, Дубна, 7–10 июля 2025.

26. 6th International Conference «Fundamental problems of superconductivity-2025», Россия, Москва, 28 сентября – 4 октября 2025.

27. XXX Симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника», Россия, Нижний Новгород, 9–13 марта 2026.

28. XXIII Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Россия, Москва, 21 мая 2026.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 статьях в рецензируемых научных периодических журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Они также представлены в 29 тезисах докладов на всероссийских и международных конференциях. Список публикаций приведен на стр. 39–46 автореферата.

Личный вклад автора

Положения, выносимые на защиту, и результаты диссертации получены автором лично. Автору принадлежит определяющий вклад в постановку задач диссертационного исследования, монтаж образцов на открытом воздухе, проведение туннельных экспериментов, обработку и интерпретацию данных, их систематизацию и апробацию, подготовку публикаций по теме диссертации. Основной вклад в написание текста публикаций [A4–A6,A8,A10–A12,A14–A17,A18] внесен автором. В совместных публикациях [A1–A3,A7,A13], результаты которых были получены взаимодополняющими методами, вклад автора заключался в описании результатов, полученных с помощью туннельной спектроскопии.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Первая глава содержит краткий литературный обзор по теме исследования, вторая глава — описание экспериментальной установки и использованного метода туннельной спектроскопии сверхпроводниковых образцов. Третья,

четвертая, пятая и шестая главы содержат оригинальные результаты, полученные автором. Объем диссертации 298 страниц, включая 116 рисунков, 7 таблиц, оглавление и список литературы из 417 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы задачи исследований и дан анализ научной новизны полученных результатов, их теоретической и практической ценности. Описывается структура диссертации, приведен список опубликованных печатных работ в научных периодических изданиях и докладов по теме диссертации.

В первой главе диссертации содержится краткий обзор литературы по структуре, физическим свойствам и фазовой диаграмме сверхпроводников $AeFe_2As_2$ (Ae — щелочноземельный металл или Eu , семейство 122), $AeAFe_4As_4$ (A — щелочной металл, семейство 1144) и $A_xFe_{2-y}Se_2$ (семейство 122-Se). Обсуждаются основные теоретические модели, предложенные для описания неклассической сверхпроводимости данных соединений, и экспериментальные данные о структуре СП-параметра порядка, полученные в литературе различными методами.

Пниктиды железа семейства $AeFe_2As_2$ [10,19] имеют при комнатной температуре тетрагональную кристаллическую структуру типа $ThCr_2Si_2$ (пространственная группа симметрии $I4/mmm$), показанную на Рис. 1а. СП-блоки $FeAs$ представляют собой пирамиды из атомов As с атомами Fe в центре, разделенные вдоль c -направления плоскостями металла Ae . Родительское соединение $BaFe_2As_2$ в стехиометрическом составе обладает дальним антиферромагнитным (АФМ) порядком с волной спиновой плотности, который исчезает при допировании или под давлением, что приводит к возникновению сверхпроводимости [18]. Фазовая диаграмма электронного допирования $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ приведена на Рис. 1б. Пниктиды семейства 1144 обладают схожей структурой СП-блоков $FeAs$, однако в качестве разделителей выступают чередующиеся вдоль c -направления плоскости A и Ae (Рис. 1б) [11,20].

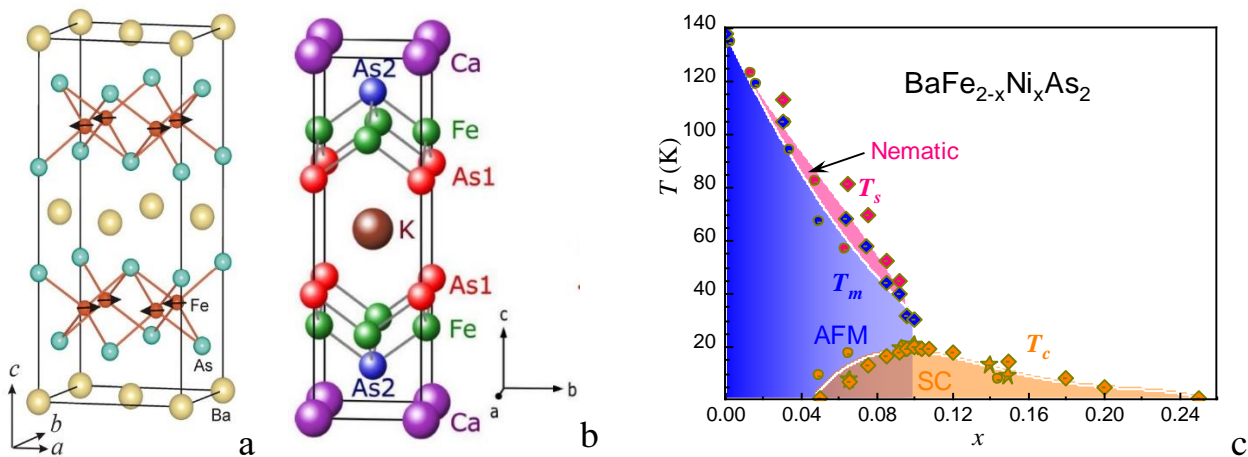


Рис. 1 — Кристаллическая структура пниктидов семейства 122 [19] (a) и 1144 [20] (b). (c) Фазовая диаграмма допирования $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$.

Ферроселениды семейства 122-Se обладают естественным фазовым расслоением [12]. Около 80% объема образца занимают кристаллы (размером до 1–2 мкм) диэлектрической АФМ-фазы со структурой $A_2Fe_4Se_5$ (т.н. 245-фаза, в которой образуется сверхрешетка из вакансий Fe с периодом $a\sqrt{5}$, где a — период решетки 245-фазы), на границах которых растут тонкие (размер до 100×1000 нм) кристаллиты СП-фазы со структурой типа $A_{0.3}Fe_2Se_2$. Различные типы замещения по-разному влияют на T_c [21]: так, изовалентное замещение (Se,S) плавно понижает T_c , образуя «полуколокол», а слабые изменения количества A или Fe вызывают скачкообразное изменение T_c от максимальных значений $T_c \approx 30\text{--}32$ К до нуля.

Согласно зонным расчетам [22], в пниктидах семейства $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ поверхность Ферми состоит из слабо гофрированных цилиндров: дырочных около Γ -точки и электронных около M точки зоны Бриллюэна (Рис. 2a). В пниктидах семейства 1144, согласно расчетам [23], уровень Ферми E_F пересекает до 10 электронных и дырочных зон (Рис. 2b). Согласно большинству имеющихся в литературе экспериментальных данных, ниже T_c в соединениях семейств Ba-122 и 1144 в различных зонах могут образовываться несколько СП-конденсатов, т.е. реализуется многощелевая сверхпроводимость.

В ферроселенидах семейства 122-Se из-за избыточного количества электронов на один атом Fe отсутствуют дырочные карманы на E_F в Γ -точке [24]. В таких

однозонных материалах ниже T_c ожидается установление однощелевой сверхпроводимости. Тем не менее, для ферроселенидов отдельных составов с помощью фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) был разрешен также электронный карман малого объема вокруг Γ -точки [25,26], на котором ниже T_c гипотетически может открываться СП-щель меньшей амплитуды (двухщелевая сверхпроводимость).

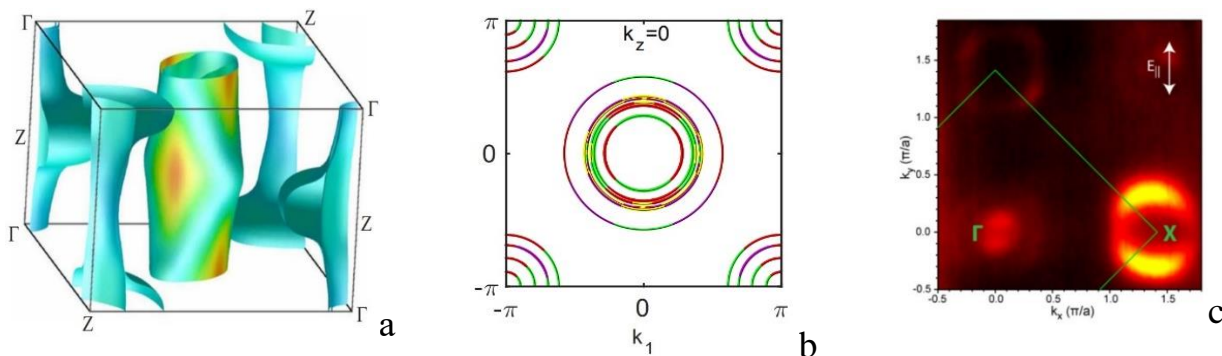


Рис. 2 — Поверхность Ферми $BaFe_2As_2$ в металлической фазе (по данным расчетов [22]), $CaKFe_4As_4$ (расчет, [23]), $K_{0.8}Fe_2Se_2$ (по данным ФЭСУР [24]).

Имеющиеся данные литературы о СП-щелевой структуре пниктидов и халькогенидов семейств 122 и 1144 довольно противоречивы. Нет единого мнения о типе симметрии СП-щели и ее эволюции вдоль фазовой диаграммы допирования. Величина характеристического отношения большой СП-щели в родственных пниктидах семейства Ва-122 $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ и $BaFe_{2-x}Co_xAs_2$ с электронным замещением составляет $2|\Delta_L(0)|/k_B T_c \approx 3.5-13.3$ (т.е. разброс значений почти в 4 раза), в пниктидах $CaKFe_4As_4$ и $EuRbFe_4As_4$ семейства 1144 — $2|\Delta_L(0)|/k_B T_c \approx 3.7-9.1$ (разброс в 2.5 раза). Исследования СП-щелевой структуры ферроселенидов проведены только для отдельных составов, при этом до сих пор не установлена связь между составом и топологией зонной структурой (наличием электронного кармана в Γ -точке). По данным работ, в которых сообщалось о наблюдении однощелевой сверхпроводимости ферроселенидов семейства 122-Se, диапазон значений характеристического отношения составляет $2|\Delta(0)|/k_B T_c \approx 4.4-8.0$, в то время как в работах, где сообщалось о наблюдении двух независимых СП-щелей, были получены значения $2|\Delta_L(0)|/k_B T_c$ от 2.9 (ниже БКШ-предела слабой связи 3.53) до 10.9.

Несмотря на обнаружение достаточно сильного изотопического эффекта на атомах Fe (изотопический коэффициент $\alpha \approx 0.35$) [27] в пниктидах железа, в работе [28] было показано, что электрон-фононное взаимодействие в этих материалах слабо и не может описать их высокие T_c . Для описания механизма неклассической сверхпроводимости были предложены две основные модели: (i) т.н. s^\pm -модель, в которой куперовские пары образуются посредством спиновых флуктуаций и имеет место знакопеременный СП-параметр порядка (что соответствует сдвигу фаз СП-конденсатов на π) [29]; (ii) s^{++} -модель, в которой куперовское спаривание осуществляется посредством орбитальных флуктуаций и реализуется знакопостоянный СП-параметр порядка [30]. СП-щелевая структура пниктидов семейств 122 может быть описана в рамках «чистого» s^\pm -подхода [31,32] или с учетом орбитальной селективности [33], а также при рассмотрении спин-флуктуационного канала в дополнение к доминирующему орбитально-флуктуационному [34] или электрон-фононному взаимодействию [35]. Согласно этим моделям, имеет место зависимость энергии связи куперовских пар от направления импульса. Усиление анизотропии СП-щели и реализация точек нулей или d -волновой симметрии предсказывается в сильно передопированных составах в рамках s^\pm -подхода [32] и модели [35], а при доминирующем s^{++} -взаимодействии с дополнительным s^\pm -каналом [34] — в сильно недоопированных составах. Имеющиеся теоретические модели для селенидов семейства 122-Se в рамках s^\pm [31,32,36] и s^{++} -подхода [37] разработаны в предположении отсутствия кармана поверхности Ферми в Γ -точке.

Отдельное внимание в главе 1 уделено обзору теоретических и экспериментальных работ, посвященных определению энергии спинового резонанса и влиянию магнитных и немагнитных примесей на T_c железосодержащих сверхпроводников в контексте установления механизма куперовского спаривания.

Вторая глава содержит описание методики измерений $I(V)$ - и $dI(V)/dV$ -характеристик и техники создания контактов на микротрещине, а также видов получаемых туннельных структур в образцах слоистых соединений; описание основных

теоретических моделей, рассматривающих эффекты многократных андреевских отражений в различных типах туннельных контактов; влияние типа симметрии СП-щели на вид андреевских особенностей $dI(V)/dV$ -спектров SnS-контактов; описание двухзонной модели для аппроксимации температурных зависимостей СП-щелей, а также характеристики использованных образцов.

Измерительная установка собрана на базе многофункционального устройства ввода-вывода АТ-МЮ-16Х (National Instruments) и персонального компьютера. Запись $dI(V)/dV$ -характеристик производится с помощью быстродействующего автоматического цифрового моста переменного тока (модуляционный метод). Температура определяется автоматически по сопротивлению калиброванного германиевого датчика с абсолютной точностью 0.2–1.0 К в диапазоне 2.5–230 К.

Туннельные контакты формировались с помощью техники ПМРКМ [38], являющейся планарной модификацией классической методики «break-junction» [39]. Образец в форме тонкой прямоугольной пластинки с размерами $3 \times 1.5 \times 0.2$ мм³ монтировался на пружинящем измерительном столике по четырехточечной схеме подключения и охлаждался до $T = 4.2$ К. Путем прецизионного изгиба столика в образце образовывалась микротрещина, выступающая в роли слабой связи, разделяющей два эквивалентных СП-берега, при этом туннельный контакт типа сверхпроводник-барьер-сверхпроводник реализовывался между террасами на криогенных сколах слоистого образца с протеканием тока вдоль c -направления. Для образцов слоистых соединений с помощью техники ПМРКМ также характерно получение стопочных структур в виде m (m — целое число, обычно $m \leq 20$) последовательно подключенных SnS или ScS-контактов с эквивалентными R_N [38].

В баллистических SnS-контактах высокой прозрачности (барьерный параметр $Z < 0.5$) с отсутствием фазовой когерентности между СП-берегами наблюдался эффект ЭНМАО. На ВАХ SnS-контактов отсутствовала сверхтоковая ветвь при $eV = 0$, наблюдался андреевский избыточный ток во всем диапазоне смещений по сравнению с ВАХ в нормальном состоянии. На $dI(V)/dV$ -спектре присутствовала субгармоническая щелевая структура (СГС) — серия минимумов динамической

проводимости при смещениях $|V_n(T)| = 2|\Delta(T)|/en$ (где $n = 1, 2, \dots$) [40–42], по положениям которых V_n можно напрямую определить амплитуду $|\Delta(0)|$ и температурную зависимость СП-щели $|\Delta(T)|$. В многощелевом сверхпроводнике ожидается появление СГС от каждой из СП-щелей. На ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектре стопочной структуры из m контактов с практически эквивалентными R_N положение любых особенностей, вызванных объемными СП-параметрами порядка, в m раз больше по сравнению с $I(V)$ и $dI(V)/dV$ -характеристиками одиночного контакта.

Форма андреевских минимумов на $dI(V)/dV$ -спектре SnS-контакта зависит от типа симметрии СП-щели. Так, в случае s -волновой симметрии СП-щели ожидаются интенсивные минимумы СГС, в то время как наличие точек нулей или реализация d -волновой симметрии СП-щели приводит к подавлению амплитуды андреевских особенностей [43]. Численные расчеты [38] в рамках подхода [43] показали, что для анизотропной СП-щели с расширенным s -волновым типом симметрии без точек нулей андреевская особенность представляет собой дублет — два минимума, соединенные «аркой», положения которых напрямую определяют экстремумы Δ^{in} и Δ^{out} углового распределения $\Delta(\theta)$, соответствующие минимальной и максимальной энергии связи куперовских пар в k -пространстве. Степень анизотропии СП-щели определялась как $A \equiv 100\% \cdot [1 - \frac{\Delta^{\text{in}}}{\Delta^{\text{out}}}]$, «эффективная» амплитуда анизотропной СП-щели — как $\Delta^{\text{eff}} \equiv \sqrt{\Delta^{\text{out}} \cdot \Delta^{\text{in}}}$.

Температурная зависимость андреевского избыточного тока $I_{\text{exc}}(T)$ SnS-контакта при постоянном смещении $eV \gg 2\Delta$, согласно всем имеющимся теоретическим моделям, пропорциональна $\Delta(T)$: $\frac{I_{\text{exc}}(T)}{I_{\text{exc}}(0)} = \frac{\Delta(T)}{\Delta(0)} \tanh \frac{eV}{2k_B T}$. Температурная зависимость критического тока фазово-когерентного ScS-контакта $I_c(T)$ пропорциональна концентрации куперовских пар $n_S(T)$: $\frac{I_c(T)}{I_c(0)} = \frac{\Delta(T)}{\Delta(0)} \cdot \tanh \frac{\Delta(T)}{2k_B T} \propto \frac{n_S(T)}{n_S(0)}$. В двухзонном приближении можно записать [A15]:

$$\frac{I_c^{\text{bulk}}(T)}{I_c^{\text{bulk}}(0)} = \omega \cdot \frac{\Delta_L(T)}{\Delta_L(0)} \cdot \tanh \frac{\Delta_L(T)}{2k_B T} + (1 - \omega) \cdot \frac{\Delta_S(T)}{\Delta_S(0)} \cdot \tanh \frac{\Delta_S(T)}{2k_B T} \quad (1)$$

$$\frac{I_{\text{exc}}(T)}{I_{\text{exc}}(0)} = \varphi \frac{\Delta_L(T)}{\Delta_L(0)} + (1 - \varphi) \frac{\Delta_S(T)}{\Delta_S(0)}, \varphi \approx \frac{G_L \Delta_L(0)}{G_L \Delta_L(0) + G_S \Delta_S(0)} = \omega \quad (2)$$

Для аппроксимации экспериментальных температурных зависимостей большой и малой СП-щелей $\Delta_L(T)$ и $\Delta_S(T)$ использовалась двухзонная БКШ-образная модель [44] на основе уравнений Москаленко и Сула [45,46] с поправками сильной связи в двух эффективных зонах ($\eta_i \equiv r_i^{\text{eigen}}/3.53$, где r_i^{eigen} — «собственное» характеристическое отношение в гипотетическом случае нулевого межзонного взаимодействия), позволяющая оценить четверку «перенормированных» констант связи $|\lambda_{ij}|$. В качестве подгоночных параметров использовались: $\alpha = \lambda_{LS}/\lambda_{SL}$; параметр $\beta = \sqrt{(\lambda_{LL}\lambda_{SS})/(\lambda_{LS}\lambda_{SL})}$, показывающий отношение сил эффективного внутризонного и межзонного взаимодействий; поправка сильной связи для зоны с малой СП-щелью η_S ; остальные параметры рассчитывались на основе вышеуказанных.

Исследованные монокристаллы $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ недодопированного состава (серия ВНК, номинальная степень замещения $x = 0.08$) и передопированных составов (серия ВНР, $x = 0.12\text{--}0.14$) были выращены методом «раствор в расплаве» К.С. Перваковым и В.А. Власенко в ФИАН; детали синтеза и характеристики приведены в [47]. Монокристаллы состава $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$, близкого к оптимально допированному с $x = 0.096$ [48], выращены Х. Ло, С.Ц. Чэнь и С. Лу в Институте физики Китайской академии наук и предоставлены М. Абдель-Хафизом. Поликристаллические образцы $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ синтезированы К.С. Перваковым, В.А. Власенко и А.С. Медведевым в ФИАН [A11,A15]. Монокристаллы $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ выращены А.Ю. Дегтяренко, К.С. Перваковым и В.А. Власенко в ФИАН [A6]. Образцы селенидов $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$, $(\text{Na}_{0.3}\text{K}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ выращены методом «раствор в расплаве» проф. И.В. Морозовым, Е.О. Рахмановым и А.И. Шиловым на Химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова [A9,A14,49].

В третьей главе диссертации приводятся результаты экспериментального исследования структуры СП-параметра порядка ферроселенидов KNFS, KFSS и NKRFs. На основе анализа СГС на ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектрах SnS-контактов в ЭНМАО-режиме, температурного поведения андреевского избыточного тока $I_{\text{exc}}(T)$ SnS-контактов и сверхтока $I_c(T)$ ScS-контактов однозначно показано

существование куперовских пар с единственной энергией связи $|\Delta|$, определена величина СП-щели, ее характеристическое отношение и температурная зависимость.

На Рис. 3 приведен пример нормированных ($V_{\text{norm}} \equiv V/m$) ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектра стопочной структуры из $m = 8$ SnS-контактов, созданной в кристалле KNFS. На реализацию ЭНМАО-режима высокой прозрачности указывает отсутствие вертикальной сверхтоковой ветви при $eV = 0$ и избыточный ток на ВАХ при $T = 4.2$ К, стремящийся к постоянному значению (сплошная линия на верхней панели). При $T > T_c^{\text{local}}$, где T_c^{local} — локальная температура СП-перехода контактной области в нормальное состояние, на ВАХ отсутствуют особенности, вызванные ЭНМАО (штрихпунктирная линия на Рис. 3а).

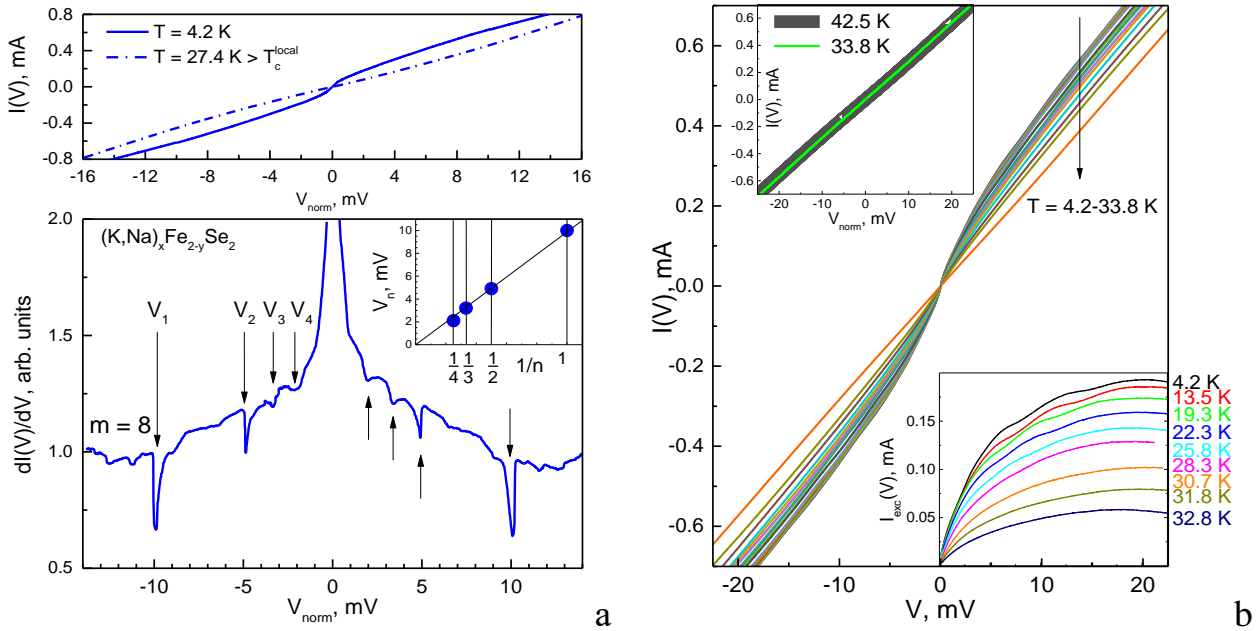


Рис. 3 — (а) ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектр стопочного ($m = 8$) SnS-контакта с $T_c^{\text{local}} \approx 27$ К, созданного в образце KNFS. Стрелками отмечены положения V_n СГС ($n = 1-4$) от СП-щели $2\Delta(0) \approx 9.9$ мэВ. Вставка: зависимость V_n от $1/n$. (б) ВАХ SnS-контакта в образце NKRFs при $T = 4.2-33.8$ К и $T = 42.5$ К (верхняя вставка). Нижняя вставка: андреевский избыточный ток $I_{\text{exc}}(V)$ при различных температурах вплоть до $T_c^{\text{local}} \approx 27$ К.

На соответствующем $dI(V)/dV$ -спектре видна область повышенной проводимости при малых смещениях (т.н. андреевский «фут»), а также СГС. Положения V_n минимумов СГС (отмечены стрелками) практически линейно зависят от обратного

номера $1/n$, как показано на вставке к Рис. 3а, и напрямую определяют амплитуду СП-щели $2|\Delta(0)| \approx 9.9$ мэВ; андреевские особенности от какого-либо другого СП-параметра порядка при $T > 4.2$ К воспроизводимо не наблюдались. Аналогичного вида $I(V)$ и $dI(V)/dV$ -характеристики SnS-контактов были получены при $T \ll T_c$ в селенидах KNFS и NKRFs. Значительная амплитуда минимумов СГС, достигающая 50% от нормальной проводимости SnS-контакта $G_N \equiv 1/R_N$, указывает на реализацию s -волновой симметрии СП-щели без точек нулей.

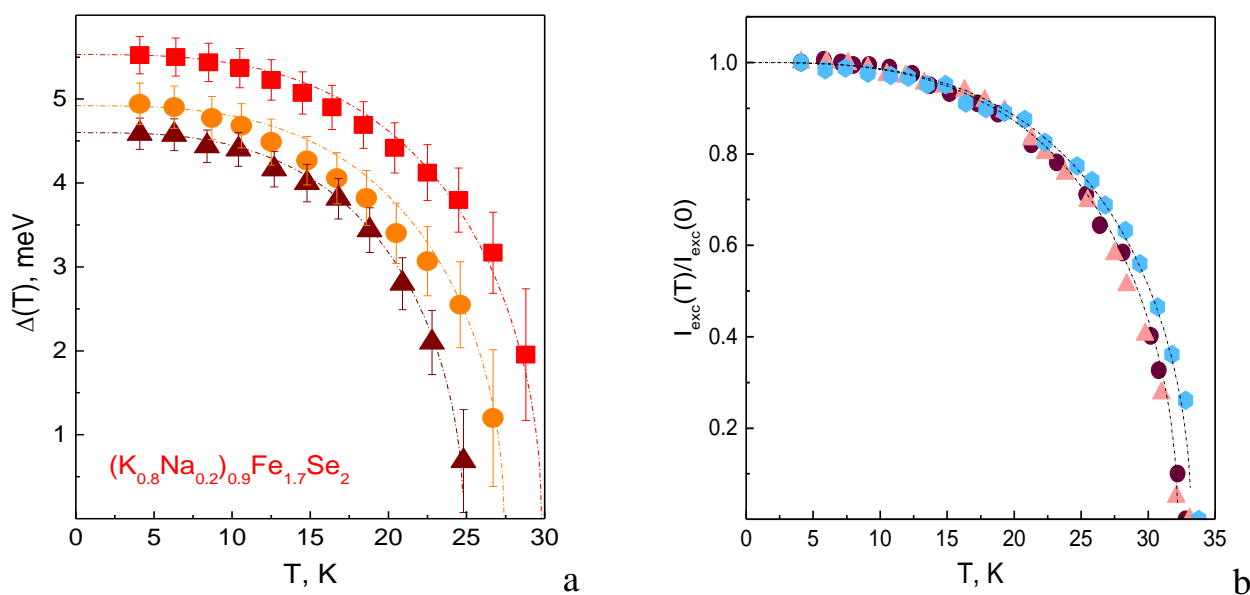


Рис. 4 — Температурная зависимость СП-щели в KNFS (символы) по данным ЭНМАО-спектроскопии SnS-контактов с различными T_c^{local} . (b) Нормированные температурные зависимости андреевского избыточного тока $I_{exc}(T)/I_{exc}(0)$ при $eV \gg 2\Delta$ для различных SnS-контактов в СП-феррохалькогениде NKRFs.

Характеристическое отношение единственной СП-щели составляет по данным ЭНМАО-спектроскопии $2|\Delta(0)|/k_B T_c^{local} \approx 4.1-4.6$, воспроизводится для SnS-контактов, созданных в различных образцах, и не коррелирует с нормальным сопротивлением SnS-контакта в широком диапазоне $R_N \approx 5-400$ Ом. Этот факт указывает на объемную природу полученного СП-параметра порядка, а также на то, что наблюдаемые на $dI(V)/dV$ -спектрах SnS-контактов особенности не могут быть вызваны геометрическими резонансами.

Температурная зависимость СП-щели $|\Delta(T)|$ была определена напрямую по

данным положений особенностей СГС $dI(V)/dV$ -спектров SnS-контактов, измеренных при различных температурах. Вид зависимости $|\Delta(T)|$, полученной с помощью ЭНМАО-спектроскопии, во всех исследованных ферроселенидах близок к однозонной БКШ-образной функции (см. пример данных для KNFS на Рис. 4а). Нормированные температурные зависимости андреевского избыточного тока в KNFS, KFSS и NKRFSS также имеют вид однозонной БКШ-образной функции $I_{\text{exc}}(T)/I_{\text{exc}}(0) \propto \Delta(T)/\Delta(0)$ (см. данных для NKRFSS на Рис. 4б). Существование единственной СП-щели $|\Delta|$ при $T \geq 4.2$ К также было подтверждено измерениями температурных зависимостей критического сверхтока ScS-контактов, которые могут быть описаны однозонной моделью с использованием экспериментальных данных $|\Delta(T)|$, полученных с помощью ЭНМАО-спектроскопии.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального определения СП-щелевой структуры пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с диапазоном степени замещения $x = 0.08-0.14$. Приведен анализ особенностей ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектров SnS-контактов, напрямую определены амплитуды СП-параметров порядка, их характеристические отношения и температурные зависимости $|\Delta_i(T)|$. Показана реализация двухщелевой сверхпроводимости и умеренная анизотропия большой и малой СП-щелей в k -пространстве (расширенный s -волновой тип симметрии без точек нулей). С помощью аппроксимаций зависимостей $\Delta_i(T)$ расширенной двухзонной моделью [44] оценены «перенормированные» константы связи, сила внутризонного и межзонного взаимодействий. На основе аппроксимации температурной $I_{\text{exc}}(T)$ формулой (2) оценены парциальные вклады двух эффективных зон в общую проводимость. Проведено сравнение и показано сходство структуры СП-параметра порядка недо- и передопированных составов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$.

В монокристаллах $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с различной степенью замещения были получены стопочные SnS-контакты, $dI(V)/dV$ -спектры которых демонстрировали особенности от нескольких СП-параметров порядка. Примеры типичных $dI(V)/dV$ -спектров SnS-контактов на базе монокристалла передопированного состава с $x =$

0.14 ($T_c \approx 12$ К) при $T = 2.8\text{--}4.2$ К, показаны на Рис. 5а. При смещениях $eV \approx 4.2\text{--}6.1$ мэВ ($n_L^{\text{out}}, n_L^{\text{in}} = 1$) видна дублетная фундаментальная гармоника от анизотропной большой СП-щели, положения минимумов которой напрямую определяют экстремумы углового распределения в k -пространстве: $|2\Delta_L^{\text{in}}(0)| \approx 4.2$ мэВ и $|2\Delta_L^{\text{out}}(0)| \approx 6.1$ мэВ (степень анизотропии $A_L \approx 31\%$). При $eV \approx 3.0$ мэВ ($n_L^{\text{out}} = 2$) присутствует вторая субгармоника от СП-параметра порядка Δ_L^{out} . При малых смещениях наблюдается дублетная фундаментальная гармоника от анизотропной малой СП-щели ($n_S^{\text{out}}, n_S^{\text{in}} = 1$) с экстремумами $|2\Delta_S^{\text{in}}(0)| \approx 1.2$ мэВ и $|2\Delta_S^{\text{out}}(0)| \approx 1.8$ мэВ ($A_S \approx 33\%$).

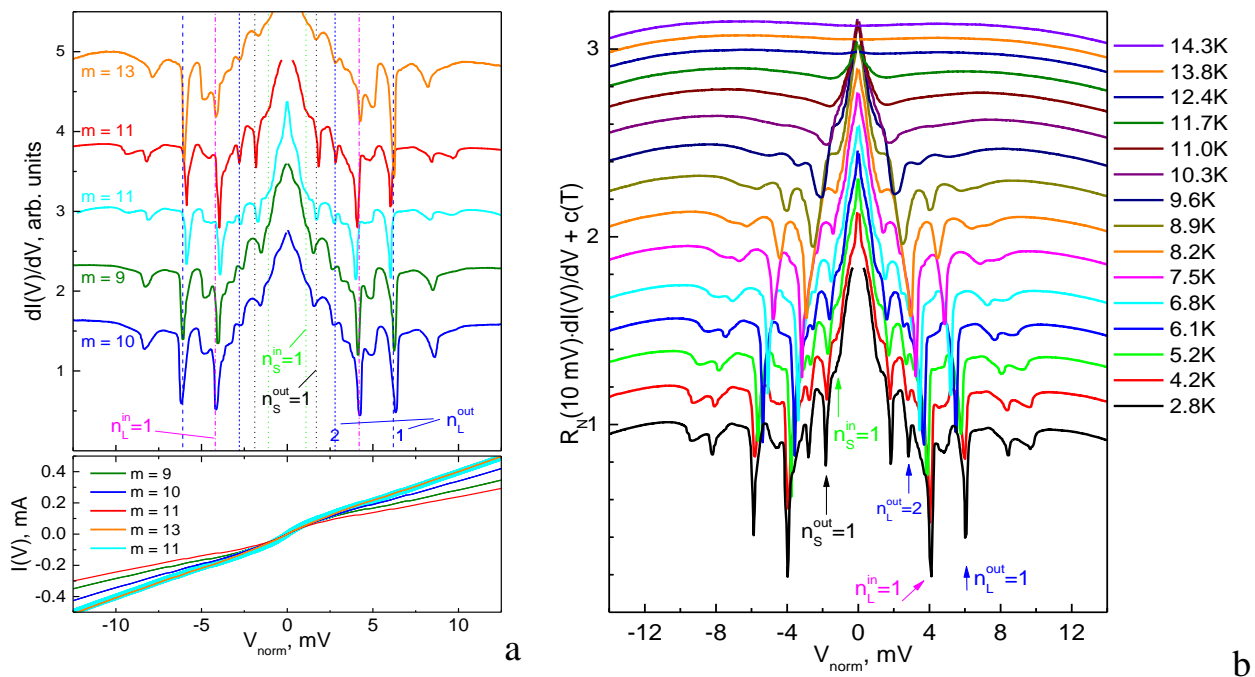


Рис. 5 — (а) ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектры стопочных SnS-контактов ($m = 9, 10, 11, 13$), созданных в одном и том же монокристалле $BaFe_{1.86}Ni_{0.14}As_2$ при $T = 4.2$ К. Вертикальными линиями отмечены положения минимумов СГС от экстремумов анизотропных в k -пространстве большой СП-щели ($n_L^{\text{in,out}}$) и малой СП-щели ($n_S^{\text{in,out}}$). (б) $dI(V)/dV$ -спектр стопочного SnS-контакта при различных температурах. Кривые вручную сдвинуты вдоль вертикальной оси для удобства, $R_N(T) \approx \text{const}$. При $T = 2.8$ К стрелками отмечены минимумы СГС.

Минимумы во внешелевой области смещений при $eV \approx 7\text{--}10$ мэВ могут быть вызваны резонансным взаимодействием с характерной бозонной модой с энергией $\varepsilon_0 \approx 2.5\text{--}4$ мэВ (предположительно, спиновым экситоном). Отметим, что структура андреевских особенностей $dI(V)/dV$ -спектров воспроизводится, не зависит от числа

контактов в стопке m и их нормального сопротивления R_N . С ростом температуры положение всех наблюдаемых особенностей $dI(V)/dV$ -спектра смещается в сторону нуля, уменьшается их амплитуда, а также величина проводимости при $eV = 0$. При $T > T_c^{\text{local}}$ $dI(V)/dV$ -спектр становится практически гладким (Рис. 5b).

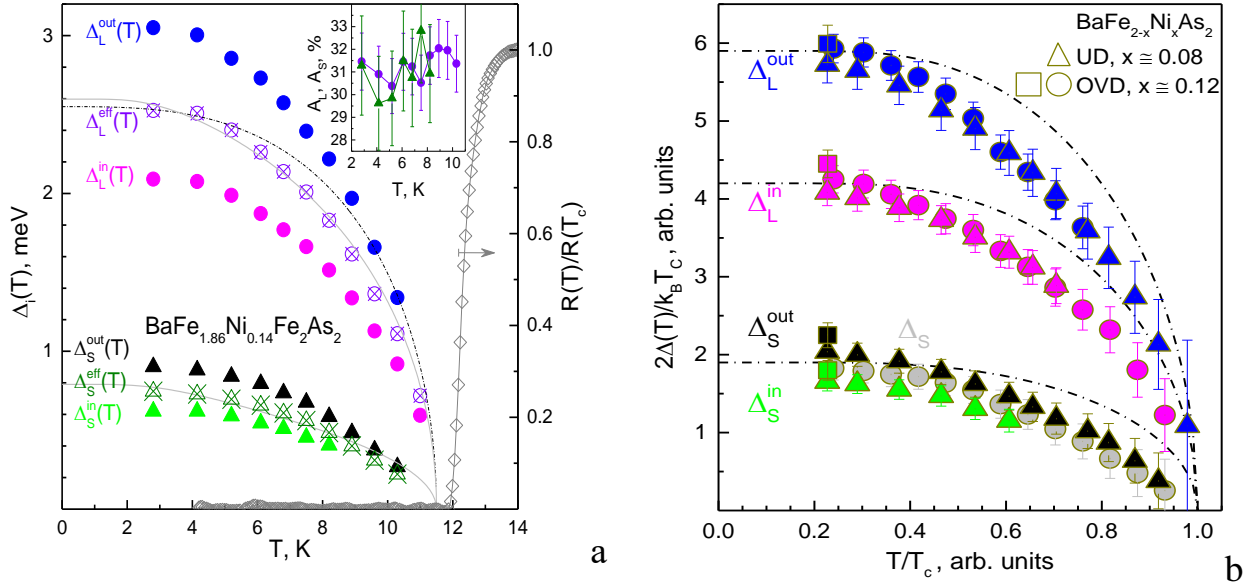


Рис. 6 — (a) Температурные зависимости СП-параметров порядка $\Delta_L^{\text{out}}(T)$, $\Delta_L^{\text{in}}(T)$ (кружки) и $\Delta_S^{\text{out}}(T)$, $\Delta_S^{\text{in}}(T)$ (треугольники) по данным ЭНМАО-спектроскопии $\text{BaFe}_{1.86}\text{Ni}_{0.14}\text{As}_2$ (см. Рис. 5b). Перечеркнутыми символами показаны температурные зависимости эффективных большой и малой СП-щели $\Delta_L^{\text{eff}}(T)$ и $\Delta_S^{\text{eff}}(T)$, аппроксимации однозонной БКШ-образной функцией и двухзонной моделью [44–46] — штрихпунктирной и сплошными линиями. На вставке кружками и треугольниками показаны зависимости степени анизотропии A_L и A_S от температуры. $R(T)$ объемного монокристалла приведено для сравнения (правая ось). (b) Нормированные температурные зависимости $2|\Delta_i(T)|/k_B T_c$ от T/T_c по данным ЭНМАО-спектроскопии VFNA слабо недо- ($x = 0.08$) и передопированных составов ($x = 0.12$).

Температурные зависимости СП-параметров порядка $\Delta_L^{\text{out}}(T)$, $\Delta_L^{\text{in}}(T)$, $\Delta_S^{\text{out}}(T)$ и $\Delta_S^{\text{in}}(T)$, определенные напрямую по данным Рис. 5b для передопированного состава $\text{BaFe}_{1.86}\text{Ni}_{0.14}\text{As}_2$, показаны на Рис. 6a. Важно отметить, что степени анизотропии большой и малой СП-щели $A_{L,S}(T) \approx \text{const}$ практически не меняются с температурой вплоть до T_c (вставка к Рис. 6a). Аналогичное поведение $A_{L,S}(T) \approx \text{const}$ наблюдалось во всех исследованных составах с вариацией степени замещения $x =$

0.08–0.14, что означает сходство температурного поведения $\Delta_i^{\text{out}}(T)$ и $\Delta_i^{\text{in}}(T)$ и указывает на то, что данные энергетические параметры являются экстремумами анизотропных в k -пространстве большой и малой СП-щелей, а не отдельными (например, изотропными) СП-щелями, открывающимися ниже T_c в различных зонах.

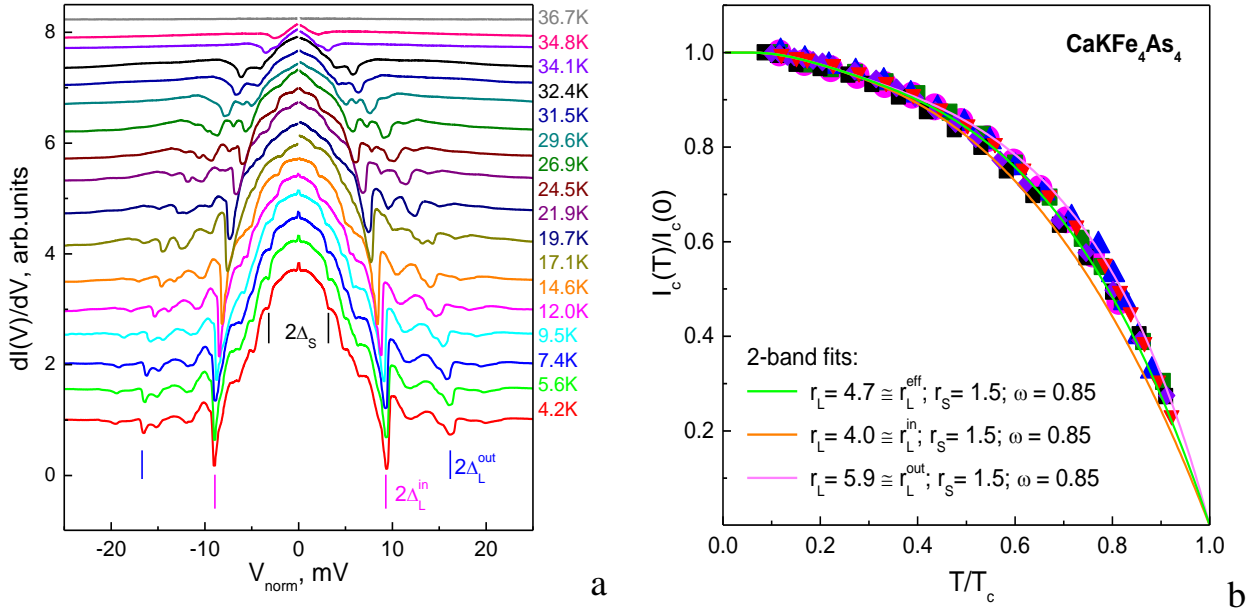


Рис. 7. (а) Температурная эволюция $dI(V)/dV$ -спектра стопочного SnS-контакта в монокристалле $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$. Кривые вручную сдвинуты вдоль вертикальной оси для удобства, $R_N(T) \approx \text{const}$. При $T = 4.2$ К штрихами отмечены минимумы СГС от СП-параметров порядка Δ_L^{out} , Δ_L^{in} и Δ_S . (б) Нормированные температурные зависимости критического сверхтока $I_c(T)/I_c(0)$ (символы) в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и их аппроксимации формулой (2) (линии).

Зависимости эффективных амплитуд большой и малой СП-щели от температуры $\Delta_L^{\text{eff}}(T)$ и $\Delta_S^{\text{eff}}(T)$ (перечеркнутые символы на Рис. 6а) типичны для случая умеренного межзонного взаимодействия и могут быть описаны в рамках расширенной двухзонной модели [44] (сплошные линии на Рис. 6а); $T_c^{\text{local}} \approx 11.5$ К данного SnS-контакта была оценена как температура, при которой аппроксимационные кривые $\Delta_i(T) \rightarrow 0$. Вид температурных зависимостей СП-параметров порядка $\Delta_L^{\text{out}}(T)$ и $\Delta_L^{\text{in}}(T)$, $\Delta_S^{\text{out}}(T)$ и $\Delta_S^{\text{in}}(T)$ схож для ВФНА с $x = 0.08$ – 0.14 . В частности, показано, что СП-щелевая структура слабо недо- и передопированных составов с $x = 0.08$ и 0.12 , соответственно, не претерпевает серьезных изменений: нормированные температурные зависимости $2|\Delta_i(T)|/k_B T_c$ от T/T_c по данным ЭНМАО-спектроскопии

близки (Рис. 6b). Полученные температурные зависимости андреевского избыточного тока $I_{\text{exc}}(T)/I_{\text{exc}}(0)$ могут быть описаны формулой (2) в двухзонном приближении с использованием экспериментальных температурных зависимостей $\Delta_L(T)$ и $\Delta_S(T)$. На основе аппроксимации оценены примерно равные вклады двух эффективных зон в общую проводимость.

В пятой главе диссертации приводятся результаты экспериментального определения СП-щелевой структуры пниктидов $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ семейства 1144. Приведены ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектры SnS-контактов, полученных в поликристаллах $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и монокристаллах $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, анализируются андреевские особенности в ЭНМАО-режиме, на основе которых напрямую определены амплитуды СП-параметров порядка, их характеристические отношения и температурные зависимости. С помощью аппроксимаций зависимостей $|\Delta_i(T)|$ расширенной двухзонной моделью [44] оценены «перенормированные» константы связи, сила внутризонного и межзонного взаимодействий. На основе температурного поведения андреевского избыточного тока $I_{\text{exc}}(T)$ оценены парциальные вклады двух эффективных зон в общую проводимость. Приведены температурные зависимости критического сверхтока $I_c^{\text{GB}}(T)$ ScS-контактов типа зерно-зерно и в объеме сверхпроводника $I_c^{\text{bulk}}(T) \propto n_S(T)$, полученные в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$, а также их аппроксимации теоретическими моделями (см. формулу (2)).

В монокристаллах $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ были получены стопочные SnS-контакты в ЭНМАО-режиме, на $dI(V)/dV$ -спектрах которых наблюдались дублетные минимумы СГС от большой СП-щели, схожие с таковыми в пниктидах BFNA родственного семейства Ba-122. Пример температурной эволюции $dI(V)/dV$ -спектра SnS-контакта с $T_c^{\text{local}} \approx 34.5$ К показан на Рис. 7а. При $T = 4.2$ К отмечены положения фундаментальных гармоник от СП-параметров порядка: малой СП-щели $2\Delta_S^{\text{out}}(0) \approx 4$ мэВ и экстремумов анизотропной в k -пространстве большой СП-щели $2\Delta_L^{\text{out}}(0) \approx 15.6$ мэВ и $2\Delta_L^{\text{in}}(T) \approx 9.2$ мэВ ($A_L \approx 41\%$). Как и в пниктидах BFNA, степень анизотропии $A_L(T)$ оставалась примерно постоянной при $T < T_c$.

Вид андреевских особенностей ВАХ и $dI(V)/dV$ -спектров SnS-контактов, полученных в поликристаллах CaFe_4As_4 и монокристаллах $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, схож. Ниже T_c реализуется двухщелевая сверхпроводимость: сосуществовании малой СП-щели и анизотропной в k -пространстве большой СП-щели ($A_L \approx 40\%$).

На основе аппроксимации температурных зависимостей $I_{\text{exc}}(T)$ формулой (2) оценен примерно 60% вклад зон с Δ_L в общую проводимость в CaFe_4As_4 . Напротив, в $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, согласно оценкам, доминирующим оказывается $\approx 75\%$ вклад зон с малой СП-щелью.

Помимо SnS-андреевских контактов, в поликристаллах CaFe_4As_4 с помощью техники ПМРКМ были получены гибридные структуры, содержащие последовательно или параллельно подключенные SnS и ScS-контакты. Показано два типа зависимостей критического сверхтока ScS-контактов, получаемых на основе измерения ВАХ таких структур при $T \leq T_c$. Гибридные структуры, образованные на межзеренных границах с подавленными СП-свойствами, имели большую площадь, малые $R_N < 5$ Ом, а соответствующие зависимости $I_c^{\text{GB}}(T)$ демонстрировали вогнутую кривизну вблизи T_c , характерную для эффекта близости. Другой тип зависимостей $I_c^{\text{bulk}}(T)$ имел выпуклую кривизну во всем температурном диапазоне до T_c , близкой к критической температуре объемного образца, демонстрировал воспроизводимость и отсутствие корреляции с R_N (Рис. 7b), таким образом, соответствовал объемному макроскопическому СП-параметру порядка — концентрации куперовских пар $I_c^{\text{bulk}}(T) \propto n_S(T)$. Показано, что полученные зависимости $I_c^{\text{bulk}}(T)$ могут быть описаны формулой (1) в двухзонном приближении (линии на Рис. 7b) при использовании характеристического отношения малой СП-щели $r_S = 1.5$ и вариации r_L от 4.7 до 5.9, хорошо согласующихся с $2|\Delta_S(0)|/k_B T_c$, $2|\Delta_L^{\text{in}}(0)|/k_B T_c$, $2|\Delta_L^{\text{out}}(0)|/k_B T_c$, соответственно, по данным ЭНМАО-спектроскопии, что указывает на согласованность двух методов спектроскопии и достоверность определяемых величин $2|\Delta_i(0)|/k_B T_c$.

В шестой главе диссертации приведен анализ и систематизация результатов проведенных экспериментальных исследований, сделаны выводы о сходстве и

различиях СП-щелевой структуры исследованных соединений типа 122. Установлена эволюция СП-свойств феррохалькогенидов KNFS, KFSS и NKFRS при вариации T_c и пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с $x = 0.08\text{--}0.14$ вдоль фазовой диаграммы допирования. Проведено сравнение структуры СП-параметра порядка $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$, $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, обсуждаются полученные зависимости $|\Delta_i(0)|$, $2|\Delta_i(0)|/k_B T_c$, а также отношение сил внутризонного и межзонного взаимодействий от T_c . На основе сравнения температурных зависимостей СП-параметров порядка $|\Delta_i(T)|$ в пниктидах семейства 1144 анализируется влияние магнитного упорядочения в подрешетке Eu^{2+} на свойства СП-подсистемы.

Поскольку использованные методы туннельной спектроскопии не являются фазочувствительными, полученные данные могут быть описаны в рамках нескольких типов СП-щелевых структур. В случае отсутствия электронного кармана поверхности Ферми в Γ -точке в исследованных селенидах возможна реализация как s^\pm -симметрии СП-параметра порядка (со сменой знака Δ между электронными листами в X и Y -точках), предложенной в [31,32,36], так и s^{++} -симметрии без смены знака [37]. При наличии электронного кармана в Γ -точке в KNFS, KFSS или NKFRS ниже T_c , на нем открывается СП-щель с такой же амплитудой $|\Delta(0)|$.

Перейдем к сравнению СП-щелевой структуры пниктидов семейства Ba-122 и 1144 $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$. На Рис. 9а приведена репрезентативная выборка нормированных $dI(V)/dV$ -спектров SnS-контактов, полученных при $T \ll T_c$ в монокристаллах $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ ($T_c^{\text{local}} \approx 34.5$ К), $\text{BaFe}_{1.92}\text{Ni}_{0.08}\text{As}_2$ недодопированного состава ($T_c^{\text{local}} \approx 19$ К), $\text{BaFe}_{1.86}\text{Ni}_{0.14}\text{As}_2$ передопированного состава ($T_c^{\text{local}} \approx 11.5$ К) и поликристалле $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ ($T_c^{\text{local}} \approx 32.5$ К). Для удобства сравнения ось смещений для каждого спектра была разделена на $2\Delta_L^{\text{eff}}(0)$. Видно, что дублетный характер фундаментальной гармоники от большой СП-щели и положения минимумов дублета (вертикальные линии на Рис. 9а) воспроизводятся. Для всех рассматриваемых соединений $\Delta_L^{\text{out}}(0) \approx 1.24\Delta_L^{\text{eff}}(0)$, $\Delta_L^{\text{in}}(0) \approx 0.81\Delta_L^{\text{eff}}(0)$, что соответствует в среднем $A_L \approx 35\%$ анизотропии большой СП-щели в k -пространстве.

В пниктидах $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ как недо-, так и передопированных составов наблюдалась дублетная фундаментальная гармоника от малой СП-щели (стрелки на Рис. 9а), положения минимумов которой также воспроизводятся и соответствуют СП-параметрам порядка $\Delta_S^{\text{out}}(0) \approx 0.37\Delta_L^{\text{eff}}(0)$, $\Delta_S^{\text{in}}(0) \approx 0.25\Delta_L^{\text{eff}}(0)$ со степенью анизотропии в среднем $A_S \approx 32\%$, близкой к значению A_L . Положение фундаментальной андреевской гармоники от Δ_S близко для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ и соответствует в среднем $\Delta_S(0) \approx 0.44\Delta_L^{\text{eff}}(0)$. В пниктидах семейства 1144 разрешение дублетного характера андреевских особенностей на $dI(V)/dV$ -спектрах от малой СП-щели осложняется их малой амплитудой ($\sim 0.05G_N$, см. Рис. 7а), которая может быть вызвана малой концентрацией куперовских пар в соответствующих зонах (по сравнению с зонами, в которых ниже T_c открывается Δ_L), так и реализацией сильной анизотропии Δ_S в k -пространстве.

Суммируя данные ЭНМАО-спектроскопии, можно сделать вывод о сходстве СП-щелевой структуры пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с электронным замещением и сверхпроводников $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ семейства 1144.

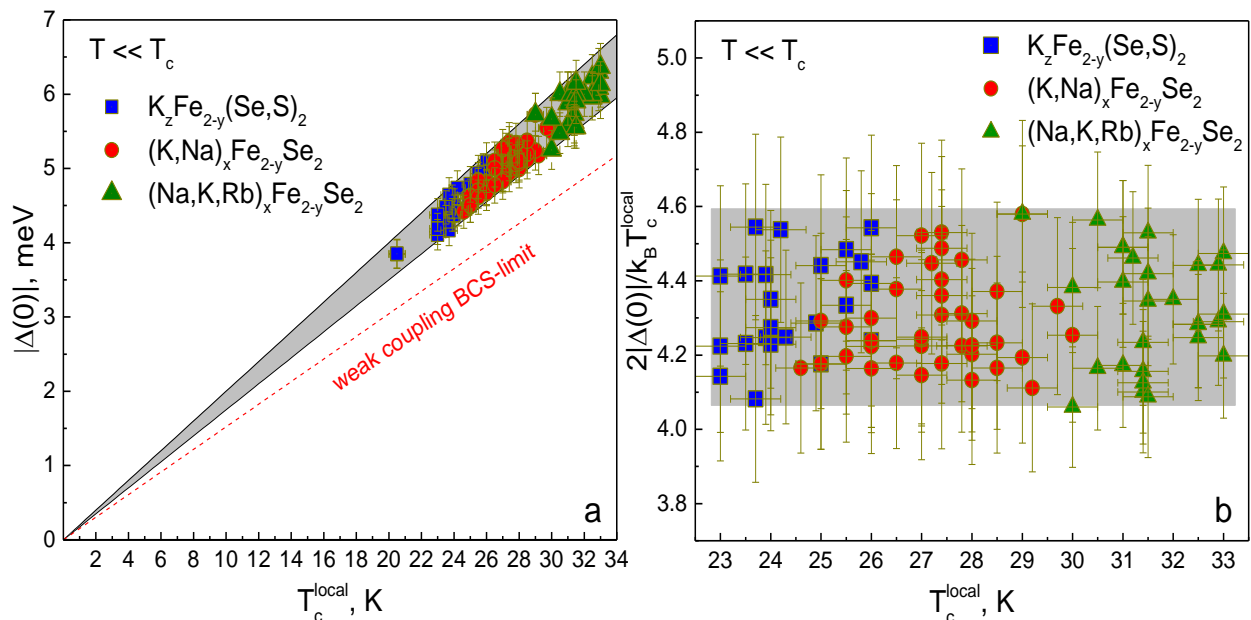


Рис. 8 — Зависимость амплитуды СП-щели $|\Delta(0)|$ (а) и характеристического отношения СП-щели $2|\Delta(0)|/k_B T_c^{\text{local}}$ (б) от T_c^{local} в KNFS (кружки), KFSS (квадраты), NKRFSS (треугольники). Серыми областями отмечены диапазоны полученных значений. Штрихпунктирной линией показана зависимость, соответствующая БКШ-пределу слабой связи с $2\Delta(0)/k_B T_c = 3.53$.

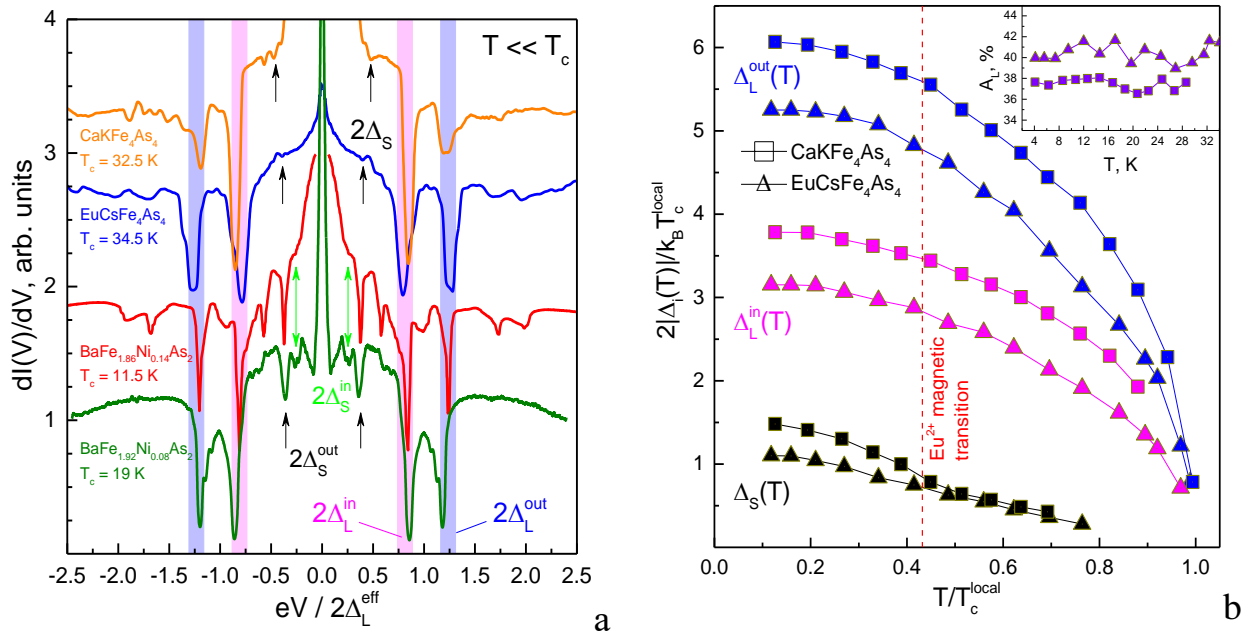


Рис. 9 — (a) $dI(V)/dV$ -спектры SnS-контактов на базе $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$, $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, $\text{BaFe}_{1.86}\text{Ni}_{0.14}\text{As}_2$ и $\text{BaFe}_{1.92}\text{Ni}_{0.08}\text{As}_2$ при $T \ll T_c$. Для каждого $dI(V)/dV$ -спектра ось смещений нормирована на $2\Delta_L^{\text{eff}}(0)$. Вертикальными линиями показана фундаментальная андреевская гармоника от СП-параметров порядка Δ_L^{out} и Δ_L^{in} , стрелками — от малой СП-щели Δ_S (Δ_S^{out} и Δ_S^{in} в пиктидах BFNA). (b) Нормированные температурные зависимости $2|\Delta_i(T)|/k_B T_c^{\text{local}}$ от T/T_c^{local} СП-параметров порядка Δ_L^{out} , Δ_L^{in} , Δ_S (символы синего, розового и черного цвета) для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ (квадраты) и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ (треугольники). На вставке теми же символами показана температурная зависимость степени анизотропии большой СП-щели $A_L(T)$.

Нормированные температурные зависимости $2|\Delta_i(T)|/k_B T_c^{\text{local}}$ от T/T_c^{local} СП-параметров порядка в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, приведенные на Рис. 9b, типичны для случая относительно слабого межзонного взаимодействия. Температурные зависимости экстремумов анизотропной большой СП-щели $\Delta_L^{\text{out}}(T)$ и $\Delta_L^{\text{in}}(T)$ подобны друг другу ($A_L(T) \approx \text{const}$, см. вставку к Рис. 9b) и близки к однозонным БКШ-образным функциям, при этом малая СП-щель $\Delta_S(T)$ более резко убывает, начиная с температуры $T \approx 0.2T_c^{\text{local}}$, и стремится к T_c^{local} с вогнутой кривизной, образуя т.н. «хвост». Несмотря на схожее температурное поведение, характеристические отношения трех СП-параметров порядка Δ_L^{out} , Δ_L^{in} и Δ_S в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ превышают таковые для $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$. Важно отметить, что на температурных зависимостях микроскопических СП-параметров порядка $\Delta_i(T)$ в $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ отсутствуют какие-либо

особенности при температуре магнитного перехода $T_m \approx 15$ К, что также соответствует данным для немагнитного родственного пниктида CaFe_4As_4 . Это указывает на отсутствие заметного влияния дальнего ферромагнитного порядка в подрешетке Eu^{2+} на структуру СП-параметра порядка $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$.

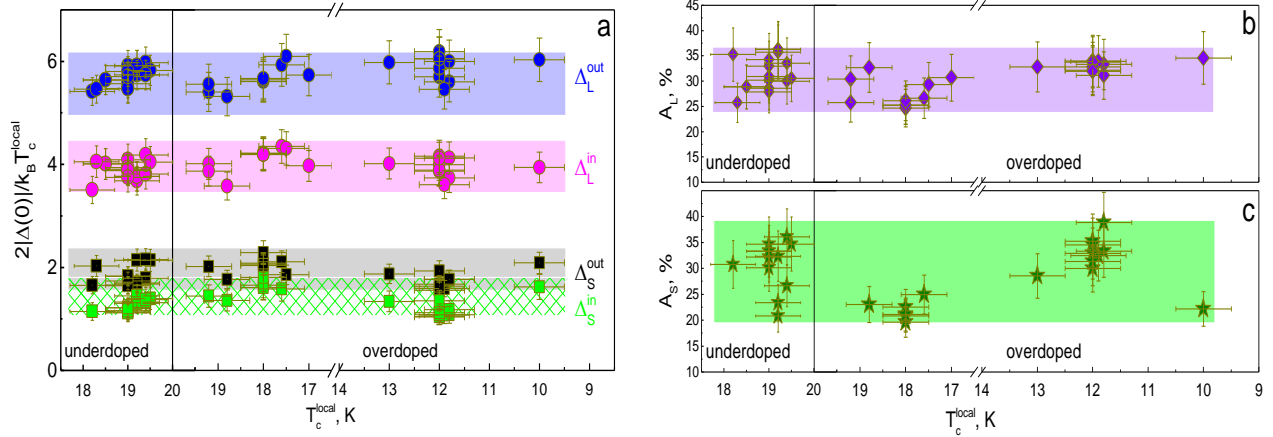


Рис. 10 — (a) Зависимость характеристических отношений СП-параметров порядка r_L^{out} и r_L^{in} (кружки), r_S^{out} и r_S^{in} (квадраты) от T_c при увеличении степени электронного замещения в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$. (b,c) Зависимости степени анизотропии большой и малой СП-щели A_L (b) и A_S (c) от T_c в том же диапазоне фазовой диаграммы допирования по данным (a).

Эволюция структуры СП-параметра порядка пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_x$ вдоль фазовой диаграммы электронного допирования приведена на Рис. 10. При увеличении степени замещения T_c возрастает в недодопированной области ($x \approx 0.08\text{--}0.1$), достигает максимума $T_c \approx 20$ К в оптимально допированной области ($x \approx 0.1$, черная вертикальная линия на Рис. 10a,b), затем падает в передопированных составах ($x \approx 0.12\text{--}0.14$). Характеристические отношения четырех СП-параметров порядка $r_L^{\text{out}} \approx 5.3\text{--}6.2$ и $r_L^{\text{in}} \approx 3.5\text{--}4.4$, $r_S^{\text{out}} \approx 1.6\text{--}2.3$ и $r_S^{\text{in}} \approx 1.0\text{--}1.8$ остаются примерно постоянными в исследованном диапазоне фазовой диаграммы. В частности, СП-щелевая структура не претерпевает серьезных изменений в недодопированной области по сравнению с передопированной. Степень анизотропии Δ_L (кружки на Рис. 10b,c) сохраняется в пределах $A_L \approx 25\%\text{--}37\%$, Δ_S (звезды) — $A_S \approx 19\%\text{--}39\%$. Не наблюдается тенденция к усилению анизотропии СП-щелей ни в недо- (предсказываемая в рамках подхода [34]), ни в передопированной области фазовой диаграммы (характерной

для «чистого» s^\pm -подхода [31,32]).

Зависимость амплитуд СП-параметров порядка $|\Delta_L^{\text{out}}(0)|$, $|\Delta_L^{\text{in}}(0)|$, $|\Delta_S^{\text{out}}(0)|$ и $|\Delta_S^{\text{in}}(0)|$ для $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ недо- и оптимально допированных составов ($x \approx 0.08\text{--}0.1$, ромбы), $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ передопированных составов ($x \approx 0.12\text{--}0.14$, кружки), $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ (квадраты) и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ (треугольники) от T_c показана на Рис. 11а. Значения $\Delta_S(0)$ для пниктидов семейства 1144 приведены квадратами и треугольниками черного цвета. Экспериментальные величины характеристических отношений $r_i(T_c)$ образуют три сектора, проходящих через точку (0,0). Таким образом, аналогично ферроселенидам KNFS, KFSS и NKRFSS (см. Рис. 8), в исследованных пниктидах семейств 122 и 1144 наблюдается скейлинг СП-параметров порядка с T_c .

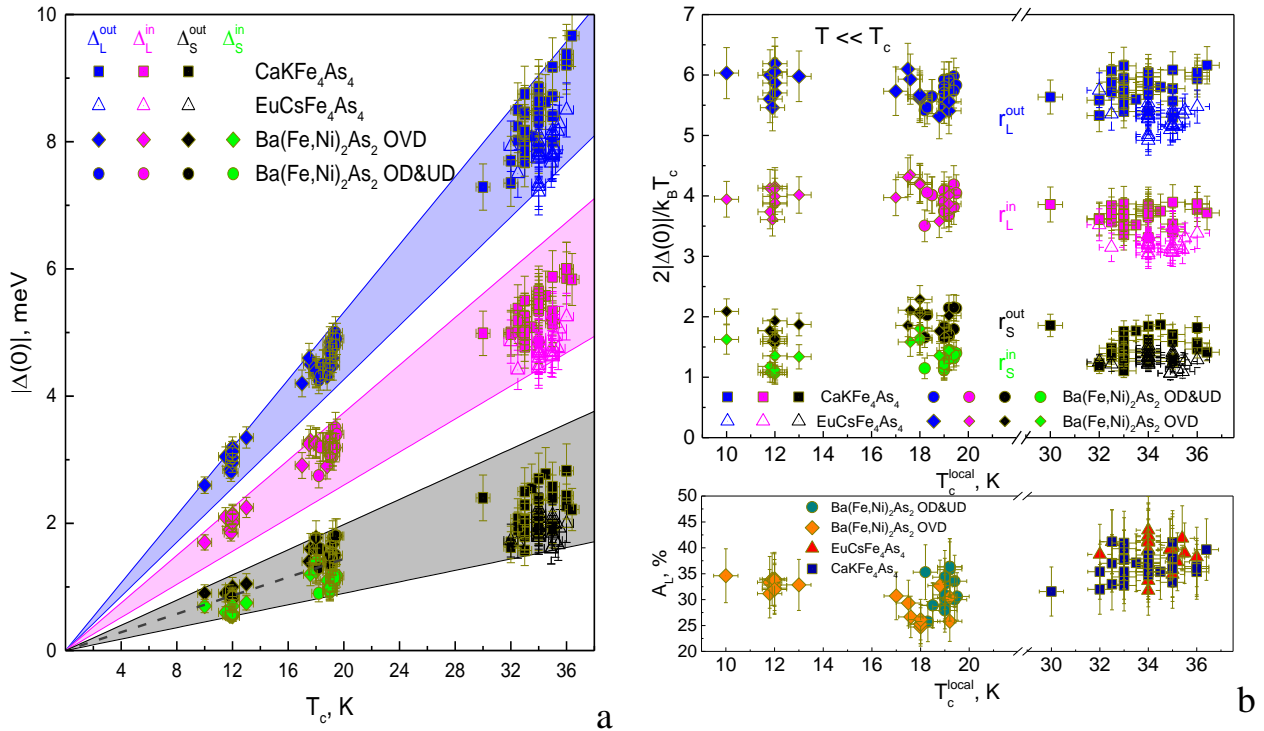


Рис. 11 — Зависимость амплитуд СП-параметров порядка (а) и их характеристических отношений (b) r_L^{out} , r_L^{in} , r_S^{out} , r_S^{in} от T_c^{local} для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ (квадраты), $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ (треугольники), $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ недо- и оптимально допированных составов (кружки), $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ передопированных составов (ромбы). (с) Зависимость степени анизотропии большой СП-щели A_L от T_c^{local} по данным (а).

Видно, что СП-щелевая структура исследованных пниктидов семейств Ba-122 и 1144 схожа и описывается единой эволюцией с T_c , несмотря на различие в типе допирования FeAs-блоков (электронного допирования в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ и

дырочного «самодопирования» в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$). Характеристические отношения экстремумов большой СП-щели $r_L^{\text{out}} \approx 5.3\text{--}6.2$ и $r_L^{\text{in}} \approx 3.3\text{--}4.3$ в пниктидах $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ и $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ близки, а диапазон отношений $r_S \approx 1.1\text{--}1.9$ в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ пересекается с диапазоном для экстремумов анизотропной малой СП-щели r_S^{in} и r_S^{out} для $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$. Степень анизотропии большой СП-щели также принимает схожие значения порядка $A_L \approx 25\%\text{--}43\%$ для данных материалов.

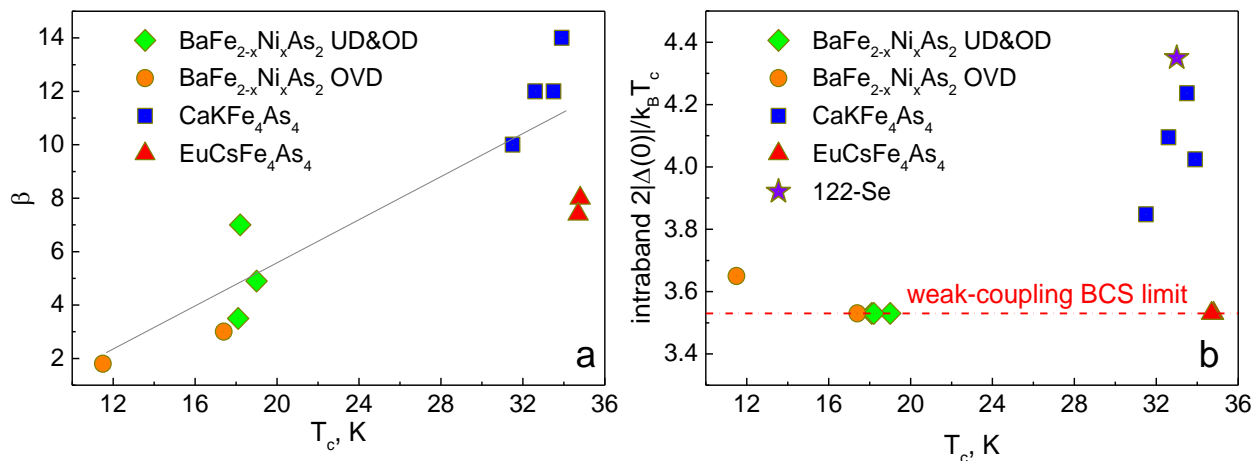


Рис. 12 — (а) Зависимость отношения сил эффективного внутризонного и межзонного взаимодействий β от T_c для $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ недо- и оптимально допированных (ромбы), передопированных составов (кружки), $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ (квадраты) и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ (треугольники). (б) Зависимость «собственного» характеристического отношения большой СП-щели от T_c . Звездой показано среднее характеристическое отношение для ферроселенидов NKRFS с максимальной $T_c \approx 33$ К.

На основе аппроксимации температурных зависимостей СП-щелей $\Delta_L^{\text{eff}}(T)$ и $\Delta_S^{\text{eff}}(T)$ в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$, $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, полученных методом ЭНМАО-спектроскопии, моделью [44] были оценены «перенормированные» константы связи $|\lambda_{ij}|$, безразмерные параметры α и β и «собственные» характеристические отношения большой и малой СП-щели r_L^{eigen} и r_S^{eigen} (соответствующие гипотетическому случаю нулевого межзонного взаимодействия). Как показано на Рис. 12а, отношение сил эффективного внутризонного и межзонного взаимодействий β заметно возрастает с увеличением T_c : от $\beta \approx 2$ для $\text{BaFe}_{1.86}\text{Ni}_{0.14}\text{As}_2$ с $T_c \approx 11.5$ К до $\beta \approx 7.4\text{--}14$ в пниктидах семейства 1144 с $T_c \approx 35$ К. Вместе с тем, как показано на Рис. 12б, «собственное» характеристическое отношение большой СП-щели r_L^{eigen} , описывающее

силу внутризонной связи в зонах с Δ_L , для пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с $x \approx 0.08-0.14$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ близко к БКШ-пределу слабой связи 3.53 (кружки, ромбы, треугольники на Рис. 12b). Напротив, в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ «собственное» характеристическое отношение достигает $r_L^{\text{eigen}} \approx 3.8-4.2$ (квадраты) и стремится к среднему значению $r \approx 4.35$ для наиболее высокотемпературных ферроселенидов NKRFs с близкой T_c (звезда на Рис. 12b). Поскольку значения $\alpha \approx 5.0-7.5$ оказались близки для исследованных пниктидов семейств Ва-122 и 1144, слабые различия в абсолютных величинах экспериментальных характеристических отношений СП-параметров порядка r_L^{out} , r_L^{in} и r_S в рамках двухзонного подхода [44] можно связать с совместным влиянием эволюции параметров β и $\eta_{L,S}$ от T_c .

Принимая во внимание примерно одинаковые поправки к «собственным» характеристическим отношениям $\eta_L \approx 1$ для $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$, можно заключить, что понижение экспериментальных значений r_L^{out} и r_L^{in} в $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ относительно таковых в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ вызвано ослаблением межзонного взаимодействия (т.е. увеличением β). Это обуславливает появление т.н. «хвоста» на температурной зависимости малой СП-щели $|\Delta_S(T)|$ в $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ (см. Рис. 9b) и нехарактерного для пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ (см. Рис. 6). Вместе с тем, усиление внутризонной связи в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ ($\eta_L \approx 1.1-1.2$, см. квадраты на Рис. 12b) обуславливает увеличение всех трех отношений $2\Delta_L^{\text{out}}(t)/k_B T_c^{\text{local}}$, $2\Delta_L^{\text{in}}(t)/k_B T_c^{\text{local}}$ и $2\Delta_S(t)/k_B T_c^{\text{local}}$ от $t \equiv T/T_c^{\text{local}}$ по сравнению с $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ во всем температурном диапазоне $T \leq T_c$ (см. Рис. 9b). В качестве причин установления сильной связи в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ можно предположить наличие пиков функции Элиашберга в области малых энергий (что может привести к относительному увеличению $|\Delta_i(0)|$) или особенностей ван Хова вблизи E_F , например, из-за присутствия плоской зоны (что может привести к увеличению плотности электронных состояний $N(E_F)$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые с помощью спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений планарных SnS-контактов на микротрещине определена и

систематизирована структура СП-параметра порядка пниктидов и халькогенидов железа семейств 122 и 1144, имеющих схожую кристаллическую структуру: пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ с электронным замещением оптимально, недо- и передопированных составов с номинальным количеством допирующего никеля $x \approx 0.08\text{--}0.14$; недопированных пниктидов $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ с магнитным упорядочением в подрешетке Eu^{2+} при $T_m \approx 15 \text{ K} < T_c$ и полностью немагнитного соединения $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$; а также феррохалькогенидов с тремя типами изовалентного замещения $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ и $(\text{Na}_{0.3}\text{K}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$.

2. Установлено, что среди железосодержащих сверхпроводников семейства 122 селениды железа, несмотря на сложный фазовый состав, имеют наиболее простую структуру СП-параметра порядка. В каждом из исследованных ферроселенидов $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ и $(\text{Na}_{0.3}\text{K}_{0.3}\text{Rb}_{0.3})_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ при $4.2 \text{ K} \leq T < T_c$ обнаружен единственный микроскопический СП-параметр порядка $|\Delta|$ с s -волновым типом симметрии без точек нулей. Показано отсутствие куперовских пар с иной энергией связи с помощью измерений температурной зависимости андреевского избыточного тока и туннельного сверхтока. В предположении отсутствия электронного кармана в Γ -точке поверхности Ферми существование единственной энергии связи $|\Delta|$ согласуется как с предсказаниями s^\pm -модели, разработанной применительно к ферроселенидам (в которой два СП-конденсата с изотропными СП-параметрами порядка $+\Delta$ и $-\Delta$, т.е. сдвигом фазы на π , образуются на электронных карманах, ориентированных вдоль k_x и k_y -направлений, при этом линия нулей щелевой функции проходит между ними), так и s^{++} -модели (где изотропная СП-щель $+\Delta$ открывается на всех электронных карманах без смены знака). В случае наличия электронной зоны, пересекающей уровень Ферми в Γ -точке, ниже T_c в ней открывается СП-щель такой же амплитуды $|\Delta|$. Показано, что температурная зависимость СП-щели $|\Delta(T)|$ близка к предсказываемой в однозонной теории БКШ.

3. Характеристическое отношение СП-щели в исследованных феррохалькогенидах $2|\Delta(0)|/k_B T_c \approx 4.35 \pm 0.25$ превышает БКШ-предел слабой связи 3.53 и указывает на реализацию сильной связи в куперовской паре. Установлено, что величина

$2|\Delta(0)|/k_B T_c$ близка для всех исследованных составов, т.е. практически не меняется в диапазоне критических температур $T_c \approx 23\text{--}33$ К, что означает прямую пропорциональность $|\Delta|$ и T_c . Таким образом, для исследованных типов изовалентного замещения нет существенного влияния на механизм куперовского спаривания 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 $(Na_{0.3}K_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$.

4. Показано, что в пниктидах $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$, $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$ ниже T_c реализуется анизотропная и как минимум двухщелевая сверхпроводимость со схожей структурой СП-параметра порядка. Во всех исследованных соединениях установлено наличие анизотропной в k -пространстве большой СП-щели с расширенным s -волновым типом симметрии без точек нулей. В $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ также обнаружена умеренная анизотропия малой СП-щели. С помощью спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений напрямую определены экстремумы углового распределения $\Delta_i(\theta)$ при $T \ll T_c$, а именно $|\Delta_i^{out}(0)|$ и $|\Delta_i^{in}(0)|$, соответствующие максимальной и минимальной энергии связи куперовских пар в одной эффективной зоне в зависимости от направления импульса. Характеристические отношения СП-параметров порядка составляют:

- для экстремумов большой СП-щели $2|\Delta_L^{out}(0)|/k_B T_c = 5.75 \pm 0.45$, $2|\Delta_L^{in}(0)|/k_B T_c = 3.9 \pm 0.4$; для экстремумов малой СП-щели $2|\Delta_S^{out}(0)|/k_B T_c = 1.9 \pm 0.4$, $2|\Delta_S^{in}(0)|/k_B T_c = 1.4 \pm 0.4$ в $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$;

- для экстремумов большой СП-щели $2|\Delta_L^{out}(0)|/k_B T_c = 5.7 \pm 0.4$, $2|\Delta_L^{in}(0)|/k_B T_c = 3.6 \pm 0.3$; для малой СП-щели — $2|\Delta_S(0)|/k_B T_c = 1.5 \pm 0.4$ в $CaKFe_4As_4$;

- для экстремумов большой СП-щели $2|\Delta_L^{out}(0)|/k_B T_c = 5.3 \pm 0.4$, $2|\Delta_L^{in}(0)|/k_B T_c = 3.25 \pm 0.25$; характеристическое отношение малой СП-щели — $2|\Delta_S(0)|/k_B T_c = 1.3 \pm 0.2$ в $EuCsFe_4As_4$.

5. Установлено, что наблюдаемая степень анизотропии большой и малой СП-щели в $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ составляет $A_L = 25\%\text{--}37\%$ и $A_S = 19\%\text{--}39\%$, соответственно; для большой СП-щели в $CaKFe_4As_4$ — $A_L = 31\%\text{--}41\%$, в $EuCsFe_4As_4$ — $A_L = 32\%\text{--}43\%$. Степень анизотропии СП-щелей в исследованных пниктидах семейств 122 и 1144 практически не меняется с ростом температуры вплоть до T_c .

6. В $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ в широком диапазоне степени электронного замещения $x \approx 0.08$ – 0.10 – 0.14 и критических температур $T_c \approx 18$ – 20 – 10 К, соответственно, СП-щелевая структура не претерпевает существенных изменений. Характеристические отношения $2|\Delta_L^{\text{in,out}}(0)|/k_B T_c$, $2|\Delta_S^{\text{in,out}}(0)|/k_B T_c$ остаются примерно постоянными в недо-, оптимально и передопированных составах в исследованном диапазоне фазовой диаграммы допирования. Отсутствует тенденция к увеличению степени анизотропии большой или малой СП-щели в k -пространстве в недо- или передопированных составах.

7. Показано, что характеристические отношения $2|\Delta_L^{\text{in,out}}(0)|/k_B T_c$ и $2|\Delta_S^{\text{in,out}}(0)|/k_B T_c$ (в материалах семейства 1144 — $2|\Delta_S(0)|/k_B T_c$) практически не меняются для пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$, $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ в диапазоне критических температур $T_c \approx 10$ – 36.5 К, таким образом, реализуется единая эволюция СП-щелевой структуры этих сверхпроводников при изменении T_c .

8. Установлено, что температурные зависимости СП-параметров порядка в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ и $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ типичны для случая умеренного межзонного взаимодействия между двумя СП-конденсатами в k -пространстве. Для и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ зависимости $|\Delta_{L,S}(T)|$ указывают на слабое межзонное взаимодействие. При $T_m \approx 15$ К $< T_c$ на температурных зависимостях $|\Delta_L^{\text{in,out}}(T)|$, $|\Delta_S(T)|$ в $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ отсутствуют какие-либо особенности, таким образом, магнитный переход в подрешетке Eu^{2+} при $T = T_m$ не влияет на температурные зависимости СП-щелей и, соответственно, на механизм куперовского спаривания в пниктидах $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ по сравнению с родственным немагнитным соединением $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$.

9. На основе анализа температурных зависимостей большой и малой СП-щелей в рамках двухзонной БКШ-образной модели с использованием уравнений Москаленко и Сула с поправками сильной связи к характеристическому отношению в обеих зонах установлено, что оба СП-конденсата в $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ и $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ находятся в пределе слабой связи. При этом только внутризонное взаимодействие в зонах с большой СП-щелью в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ на 9%–20% превосходит предел слабой связи и соответствует силе связи в феррохалькогенидах $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$,

$K_{0.8}Fe_{1.7}(Se_{0.73}S_{0.27})_2$, $(Na_{0.3}K_{0.3}Rb_{0.3})_{0.8}Fe_{1.7}Se_2$. Установлено, что отношение силы спаривающего внутризонного и межзонного взаимодействий в пниктидах $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$, $CaFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_4$ растёт с увеличением T_c .

Публикации по теме диссертации

Статьи в научных периодических журналах:

[A1] Kuzmicheva T.E., Vlasenko V.A., Gavrilkin S.Yu., Kuzmichev S.A., Pervakov K.S., Roshchina I.V., Pudalov V.M. Vortex structure and anisotropic superconducting gaps in $Ba[Fe(Ni)]_2As_2$ // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2016. – Т. 29. – №. 12. – С. 3059–3064.

[A2] Кузьмичева Т.Е., Муратов А.В., Кузьмичев С.А., Садаков А.В., Алещенко Ю.А., Власенко В.А., Мартовицкий В.П., Перваков К.С., Ельцев Ю.Ф., Пудалов В. М. О структуре параметра порядка в высокотемпературных сверхпроводниках на основе железа // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187. – №. 4. – С. 450–462.

[A3] Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Sadakov A.V., Gavrilkin S.Yu., Tsvetkov A.Yu., Lu X., Luo H., Vasiliev A.N., Pudalov V.M., Chen X.-J., Abdel-Hafiez M. Superconducting gap symmetry in the superconductor $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ // Physical Review B. – 2018. – Т. 97. – №. 23. – С. 235106.

[A4] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Перваков К.С., Власенко В.А. Спектроскопия многократных андреевских отражений сверхпроводящих пниктидов $Ba(Fe,Ni)_2As_2$ оптимального состава // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – №. 12. – С. 822–829.

[A5] Kuzmicheva T.E., Kuzmichev S.A., Pervakov K.S., Vlasenko V.A. Superconducting order parameters in overdoped $BaFe_{1.86}Ni_{0.14}As_2$ revealed by multiple Andreev reflection spectroscopy of planar break junctions // Physical Review B. – 2021. – Т. 104. – №. 17. – С. 174512.

[A6] Кузьмичев С.А., Перваков К.С., Власенко В.А., Гаврилкин С.Ю., Дегтяренко А.Ю., Кузьмичева Т.Е. Андреевская спектроскопия стехиометрического сверхпроводящего пниктида $EuCsFe_4As_4$ // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 116. – №. 10. – С. 702–707.

[A7] Садаков А.В., Муратов А.В., Кузьмичев С.А., Соболевский О.А., Массалимов

Б.И., Прищепа А.Р., Михайлов В.М., Перваков К.С., Власенко В.А., Кузьмичева Т.Е. Определение сверхпроводящего параметра порядка слабо недодопированных пниктидов $\text{BaFe}_{1.92}\text{Ni}_{0.08}\text{As}_2$ двумя взаимодополняющими методами //Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 116. – №. 10. – С. 686–693.

[A8] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Перваков К.С., Власенко В.А. Сравнение щелевой структуры сверхпроводящих пниктидов $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ недо- и передопированного состава //Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т. 118. – №. 7. – С. 526–532.

[A9] Ильина А.Д., Михайлов В.М., Никитченков И.А., Морозов И.В., Шилов А.И., Кузьмичев С.А., Кузьмичева Т.Е. SnS-андреевская спектроскопия сверхпроводящего селенида $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_{1.6}\text{Se}_2$ //Краткие сообщения по физике. – 2023. – Т. 50. – №. 12. – С. 49–57.

[A10] Kuzmicheva T., Pervakov K., Vlasenko V., Degtyarenko A., Kuzmichev S. Temperature Dependence of the Superconducting Order Parameter in Stoichiometric Alkali Metal-Based Pnictide $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ //Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2024. – Т. 37. – №. 2. – С. 379–388.

[A11] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Медведев А.С. Многощелевая сверхпроводимость немагнитного стехиометрического пниктида $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ //Письма в ЖЭТФ. – 2024. – Т. 119. – №. 10. – С. 757–763.

[A12] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Рахманов Е.О., Морозов И.В. Однощелевая сверхпроводимость $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.72}\text{S}_{0.28})_2$ по данным туннельной и андреевской спектроскопии //Краткие сообщения по физике. – 2024. – Т. 51. – №. 8. – С. 10–18.

[A13] Кузьмичева Т.Е., Алещенко Ю.А., Безотосный П.И., Гаврилкин С.Ю., Дмитриева К.А., Ильина А.Д., Кузьмичев С.А., Муратов А.В., Никитченков И.А., Рыбальченко Г.В. Экспериментальные и теоретические исследования пниктидов семейства BaFe_2As_2 с электронным замещением (Миниобзор) //Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – №. 6. – С. 462–480.

[A14] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Ильина А.Д., Никитченков И.А., Рахманов Е.О., Шилов А.И., Морозов И.В. Сравнение сверхпроводящих свойств ферроселенидов калия с изовалентным замещением //Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – №.

8. – С. 696–703.

[A15] Кузьмичева Т.Е., Ильина А.Д., Никитченков И.А., Перваков К.С., Власенко В.А., Медведев А.С., Кузьмичев С.А. Многозонный квазичастичный транспорт в туннельных контактах на базе сверхпроводящего стехиометрического пниктида $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – №. 7. – С. 1215–1225.

[A16] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Ильина А.Д., Никитченков И.А., Шилов А.И., Рахманов Е.О., Морозов И.В. Однощелевая сверхпроводимость селенидов $(\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2})_{0.9}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ и $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ по данным спектроскопии эффекта многократных андреевских отражений // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – №. 6. – С. 1069–1078.

[A17] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Ильина А.Д., Никитченков И.А., Рахманов Е.О., Шилов А.И., Морозов И.В., Медведев А.С., Власенко В.А., Перваков К.С. Температурная зависимость критического тока межзеренных границ в $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se}_{0.73}\text{S}_{0.27})_2$ и $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ // Краткие сообщения по физике. – 2025. – №. 7. – С. 47–60.

[A18] Kuzmicheva T., Lomonosova A., Nikitchenkov I., Kuzmichev S., Rakhmanov Ye., Morozov I. Direct Spectroscopic Evidence of a Strong-Coupled Single-Gap Superconductivity in $(\text{Na,K,Rb})_{0.8}\text{Fe}_{1.74}\text{Se}_2$ Iron Selenide // European Physical Journal Plus. – 2026. – Т. 141. – С. 520.

Тезисы докладов на всероссийских и международных конференциях:

[B1] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Анизотропия параметров порядка в сверхпроводящем пниктиде Ba-122, оптимально допированном никелем // XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016», Сборник тезисов. – М.: МГУ, 2016. – Т. 2. – С. 124–125.

[B2] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, V.M. Pudalov, Anisotropic superconducting gaps in optimally doped $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ and $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ pnictides // International workshop “Advances in preparation and investigation of emergent iron-based superconductors” (IBS-2016), Book of Abstracts. – 2016. – С. 16.

[B3] Т.Е. Кузьмичева, В.А. Власенко, С.А. Кузьмичев, К.С. Перваков, В.М.

Пудалов, Анизотропия параметров порядка в железосодержащих сверхпроводниках $\text{Ba}(\text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ и $\text{Ba}[\text{Fe}(\text{Ni})]_2\text{As}_2$ // Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Сборник тезисов. – М.: ИФВД, 2016. – С. 18–19.

[B4] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, V.M. Pudalov, Anisotropic superconducting gaps in optimally doped $\text{Ba}(\text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ and $\text{Ba}[\text{Fe}(\text{Ni})]_2\text{As}_2$ pnictides // Physics in Quantum Matter Superconductivity, Magnetism & Ferroelectricity (Superstripes 2016), Book of Abstracts. – 2016. – С. 190–191.

[B5] Т.Е. Кузьмичева, В.А. Власенко, С.А. Кузьмичев, К.С. Перваков, Анизотропия параметра порядка сверхпроводящего $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ // XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Сборник аннотаций. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2016. – С. 277.

[B6] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, A.V. Muratov, K.S. Pervakov, A.V. Sadakov, V.M. Pudalov, Anisotropic superconducting gaps in optimally doped $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ and $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ // MSU-IFW-ILTPE Joint Workshop “Synthesis, Theoretical Examination and Experimental Investigation of Emergent Materials”, Book of Abstracts. – 2017. – С. 21.

[B7] Кузьмичев С.А., Кузьмичева Т.Е., Муратов А.В., Садаков А.В., Алещенко Ю.А., Власенко В.А., Мартовицкий В.П., Перваков К.С., Ельцев Ю.Ф., Пудалов В.М., Вихревая структура и анизотропия сверхпроводящих щелей в $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$ // XV Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления» памяти бессменного председателя конференции академика Л.В. Келдыша, Сборник тезисов. – М.: ФИАН, 2017. – С. 67.

[B8] Kuzmicheva T., Kuzmichev S., Muratov A., Pervakov K., Sadakov A., Pudalov V., Anisotropic superconducting gaps in optimally doped $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ and $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ // 28th International Conference on Low Temperature Physics LT28, Book of Abstracts. – 2017. – С. P688.

[B9] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, Multiple Andreev reflection effect spectroscopy of iron-based superconductors // International Symposium “Perspectives of High-

Temperature Superconductivity”, Book of Abstracts. – 2017. – С. 19.

[B10] T.E. Kuzmicheva, Anisotropic superconducting gaps in optimally doped $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ //International Conference on Multi-Condensate Superconductivity and Superfluidity in Solids and Ultra-cold Gases. – URL: <https://indico.ictp.it/event/8310>

[B11] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Перваков К.С., Власенко В.А., Эволюция сверхпроводящего параметра порядка в передопированных пниктидах $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$, //Материалы Международного научного форума «Ломоносов-2020» [электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2020.

[B12] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Перваков К.С., Власенко В.А., Эволюция сверхпроводящих параметров порядка в пниктидах $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$ по данным спектроскопии многократных андреевских отражений //XIII Сибирский семинар по высокотемпературной сверхпроводимости и физике наноструктур ОКНО-2021, – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2021. – С. 39.

[B13] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Перваков К.С., Власенко В.А., Эволюция сверхпроводящего параметра порядка в передопированных пниктидах $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$ //Материалы Международного научного форума «Ломоносов-2021» [электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2021.

[B14] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Эволюция сверхпроводящего параметра порядка в пниктидах и селенидах железа ///Материалы Международного научного форума «Ломоносов-2022» [электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2022.

[B15] Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, К.С. Перваков, В.А. Власенко, И.В. Морозов, А.И. Болталин, А.И. Шилов, Эволюция сверхпроводящего параметра порядка с электронным допированием в арсенидах и селенидах железа семейства 122 методами спектроскопии многократных андреевских отражений //XIX Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Сборник тезисов. – М.: ФИАН, 2022. – С. 154.

[B16] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, I.V. Morozov, A.I. Shilov, K.S. Pervakov, V.A. Vlasenko, Evolution of the Superconducting Order Parameter in $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{As}_2$ and $(\text{K},\text{Na})\text{Fe}_2\text{Se}_2$ under Electron Doping //8th International Conference on Superconductivity

and Magnetism ICSM2023, Abstract Book. – 2023. – С. 475.

[B17] T.E. Kuzmicheva, A.Yu. Degtyarenko, S.Yu. Gavrilkin, K.S. Pervakov, V.A. Vlasenko, S.A. Kuzmichev, Direct Tunneling Probe of the Superconducting Order Parameter in $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ //13th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS 2023), Abstract Book. – 2023. – С. 496.

[B18] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Ильина А.Д., Никитченков И.А., Шилов А.И., Рахманов Е.О., Морозов И.В., Туннельная спектроскопия железосодержащих халькогенидов семейства 122-Se: прямое определение структуры сверхпроводящего параметра порядка //Международная конференция «39-е Совещание по физике низких температур (ФНТ 2024)», Сборник тезисов. – Черногловка, ИФТТ, 2024. – С. 100.

[B19] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, I.V. Morozov, A.I. Shilov, Ye.O. Rakhmanov, K.S. Pervakov, V.A. Vlasenko, Doping Evolution of the Superconducting Gap Structure of the 122 Family Pnictides and Chalcogenides //9th International Conference on Superconductivity and Magnetism ICSM2024, Abstract Book. – 2024. – С. 692.

[B20] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, A.Yu. Degtyarenko, K.S. Pervakov, V.A. Vlasenko, Temperature Dependence of the Superconducting Order Parameter in Stoichiometric Alkali Metal-Based Pnictide $\text{EuCsFe}_4\text{As}_4$ //9th International Conference on Superconductivity and Magnetism-ICSM2024, Abstract Book. – 2024. – С. 68.

[B21] T.E. Kuzmicheva, A.V. Muratov, S.A. Kuzmichev, A.D. Ilina, I.A. Nikitchenkov, A.I. Shilov, Ye.O. Rakhmanov, I.V. Morozov, Spectroscopic Study of $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}(\text{Se},\text{S})_2$ Selenides in the Superconducting and the Normal State //14th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition (APMAS 2024), Book of Abstract. – 2024. – С. 34–35.

[B22] Т.Е. Кузьмичева, А.В. Муратов, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ильина, И.А. Никитченков, Е.О. Рахманов, А.И. Шилов, И.В. Морозов, Спектроскопические исследования свойств сверхпроводящего и нормального состояния селенидов $A\text{Fe}_2(\text{Se},\text{S})_2$ (А — щелочной металл) //XXIX Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Тезисы докладов. – Нижний Новгород: ИФМ, 2025. – С. 62.

- [B23] Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ильина, И.А. Никитченков, Е.О. Рахманов, А.И. Шилов, И. В. Морозов, Сравнение сверхпроводящих свойств ферроселенидов с изовалентным замещением //XXII Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Сборник тезисов. – М.: ФИАН, 2025. – С. 78.
- [B24] Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ильина, И.А. Никитченков, Е.О. Рахманов, А.И. Шилов, И. В. Морозов, Однощелевая сверхпроводимость ферроселенидов с изовалентным замещением, Материалы конференции «Современные сверхпроводящие материалы, технологии и устройства». – URL: <https://supercond.ru/konferenciya-23-07-2025/>.
- [B25] Кузьмичева Т.Е., Кузьмичев С.А., Ильина А.Д., Никитченков И.А., Шилов А.И., Рахманов Е.О., Морозов И.В., Прямое определение структуры сверхпроводящего порядка ферроселенидов натрия, калия и рубидия с изовалентным замещением //IV Международная конференция «Физика конденсированных состояний» ФКС-2025, Сборник тезисов. – Черногловка, ИФТТ, 2025. – С. 201.
- [B26] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, A.D. Iina, I.A. Nikitchenkov, A.I. Shilov, E.O. Rakhmanov, I.V. Morozov, Single-gap superconductivity of alkali-metal ferroselenides with isovalent substitution //2nd International Workshop on Superconducting and Magnetic Hybrid Structures-2025, Abstract book. – 2025. – С. 28.
- [B27] T.E. Kuzmicheva, S.A. Kuzmichev, A.D. Iina, I.A. Nikitchenkov, E.O. Rakhmanov, A.I. Shilov, I.V. Morozov, Comparison of the Superconducting Properties of the Iron Selenides with Isovalent Substitution //6th International Conference «Fundamental Problems of Superconductivity-2025», Abstract book. – 2025. – С. 134.
- [B28] Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ломоносова, И.А. Никитченков, Е.О. Рахманов, А.И. Шилов, И.В. Морозов //Прямое доказательство однощелевой сверхпроводимости ферроселенидов калия с изовалентным замещением //XXX Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Сборник тезисов. – Нижний Новгород: ИФМ, 2026. – С. 64.
- [B29] Т.Е. Кузьмичева, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ильина, И.А. Никитченков, Е.О.

Рахманов, А.И. Шилов, И.В. Морозов, Прямое доказательство одноцелевой сверхпроводимости ферроселенидов с изовалентным замещением //XXIII Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», Сборник тезисов. – М.: ФИАН, 2026. – С. 122–125.

Цитируемая литература

- [1] Kamihara Y. et al. //J. Amer. Chem. Soc. – 2006. – Т. 128. – №. 31. – С. 10012–10013.
- [2] Kamihara Y. et al. //J. Amer. Chem. Soc. – 2008. – Т. 130. – №. 11. – С. 3296–3297.
- [3] Nagamatsu J. et al. //Nature. – 2001. – Т. 410. – №. 6824. – С. 63–64.
- [4] Bednorz J. G., Müller K. A. //Z. Phys. B Condensed Matter. – 1986. – Т. 64. – №. 2. – С. 189–193.
- [5] М.В. Садовский М. В. //УФН. – 2008. – Т. 178. – №. 12. – С. 1243–1271.
- [6] Ивановский А. Л. //УФН. – 2008. – Т. 178. – №. 12. – С. 1273–1306.
- [7] Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З. //УФН. – 2008. – Т. 178. – №. 12. – С. 1307–1334.
- [8] Fujioka M. et al. //Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 105. – №. 10.
- [9] Ge J. F. et al. //Nature Materials. – 2015. – Т. 14. – №. 3. – С. 285–289.
- [10] Rotter M., et al. //Phys. Rev. Letters. – 2008. – Т. 101. – №. 10. – С. 107006.
- [11] Iyo A. et al. //J. Amer. Chem. Soc. – 2016. – Т. 138. – №. 10. – С. 3410–3415.
- [12] Guo J. et al. //Phys. Rev. B. – 2010. – Т. 82. – №. 18. – С. 180520
- [13] Tarantini C. et al. //Scientific Reports. – 2014. – Т. 4. – №. 1. – С. 7305.
- [14] Singh S. J. et al. //Phys. Rev. Materials. – 2018. – Т. 2. – №. 7. – С. 074802.
- [15] Fernandes R. M., Chubukov A. V. //Rep. Progr. Phys. – 2016. – Т. 80. – №. 1. – С. 014503.
- [16] Kontani H. et al. //Advances in Physics. – 2021. – Т. 70. – №. 3. – С. 355–443.
- [17] Hirschfeld P. J. //C. R. Physique. – 2016. – Т. 17. – №. 1–2. – С. 197–231.
- [18] Кузьмичева Т. Е. и др. //Письма в ЖЭТФ. – 2025. – Т. 121. – №. 6. – С. 462–480.
- [19] Huang Q. et al. //Phys. Rev. Lett. – 2008. – Т. 101. – №. 25. – С. 257003.
- [20] Ding Q. P. et al. //Phys. Rev. Letters. – 2018. – Т. 121. – №. 13. – С. 137204.
- [21] Krzton-Maziopa A. et al. //J. Crystal Growth. – 2012. – Т. 360. – С. 155–157.

-
- [22] Singh D. J. //Phys. Rev. B. – 2008. – Т. 78. – №. 9. – С. 094511.
- [23] Lochner F. et al. //Phys. Rev. B. – 2017. – Т. 96. – №. 9. – С. 094521.
- [24] Nekrasov I. A., Sadovskii M. V. //JETP Letters. – 2011. – Т. 93. – С. 166–169.
- [25] Yi M. et al. //Phys. Rev. Lett. – 2013. – Т. 110. – №. 6. – С. 067003.
- [26] Mou D. et al. //Phys. Rev. Lett. – 2011. – Т. 106. – №. 10. – С. 107001.
- [27] Liu R. H. et al. //Nature. – 2009. – Т. 459. – №. 7243. – С. 64–67.
- [28] Boeri L., et al. //Physica C. – 2009. – Т. 469. – №. 9–12. – С. 628–634.
- [29] Mazin I. I. et al. //Phys. Rev. Lett. – 2008. – Т. 101. – №. 5. – С. 057003.
- [30] Onari S., et al. //Phys. Rev. B. – 2010. – Т. 81. – №. 6. – С. 060504.
- [31] Hirschfeld P. J., et al. //Rep. Progr. Phys. – 2011. – Т. 74. – №. 12. – С. 124508.
- [32] Коршунов М. М. //УФН. – 2014. – Т. 184. – №. 8. – С. 882–888.
- [33] Yu R., et al. //Phys. Rev. B. – 2014. – Т. 89. – №. 2. – С. 024509.
- [34] Saito T. et al. //Phys. Rev. B. – 2013. – Т. 88. – №. 4. – С. 045115.
- [35] Karakozov A. E., Magnitskaya M. V. //J Surf. Invest: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2021. – Т. 15. – №. Suppl 1. – С. S145–S149.
- [36] Khodas M., Chubukov A. V. //Phys. Rev. Lett. – 2012. – Т. 108. – №. 24. – С. 247003.
- [37] Saito T., et al. //Phys. Rev. B. – 2011. – Т. 83. – №. 14. – С. 140512.
- [38] Kuzmichev S. A., Kuzmicheva T. E. //Low Temp. Phys. – 2016. – Т. 42. – №. 11. – С. 1008–1027.
- [39] Moreland J., Ekin J. W. //J. Appl. Phys. – 1985. – Т. 58. – №. 10. – С. 3888–3895.
- [40] Octavio M. et al. //Phys. Rev. B. – 1983. – Т. 27. – №. 11. – С. 6739.
- [41] Kümmel R. et al. //Phys. Rev. B. – 1990. – Т. 42. – №. 7. – С. 3992.
- [42] Gunsenheimer U., Zaikin A. D. //Phys. Rev. B. – 1994. – Т. 50. – №. 9. – С. 6317.
- [43] Devereaux T. P., Fulde P. //Phys. Rev. B. – 1993. – Т. 47. – №. 21. – С. 14638.
- [44] Кузьмичева Т. Е., Кузьмичев С. А. //Физ. Низк. Темп. – 2019. – Т. 45. – №. 11. – С. 1366–1380.
- [45] Москаленко В. А. //Физика Мет. Металл. – 1959. – Т. 8. – №. 4. – С. 503–513.
- [46] Suhl H., et al. //Phys. Rev. Lett. – 1959. – Т. 3. – №. 12. – С. 552.

-
- [47] Ельцев Ю. Ф. и др. //УФН. – 2014. – Т. 184. – №. 8. – С. 897–902.
- [48] Chen Y. et al. //Supercond. Sci. Technol. – 2011. – Т. 24. – №. 6. – С. 065004
- [49] Rakhmanov Y. et al. //J. Supercond. Nov. Magn. – 2026. – Т. 39. – №. 1. – С. 24.