Письма в ЖЭТФ, том 119, вып. 10, с. 757 – 763

Многощелевая сверхпроводимость немагнитного стехиометрического пниктида $CaKFe_4As_4$

Т. Е. Кузьмичева[+1)], С. А. Кузьмичев[*+], А. С. Медведев[+]

[+] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

[*] Физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 марта 2024 г.
После переработки 14 апреля 2024 г.
Принята к публикации 18 апреля 2024 г.

С помощью спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений, реализованного в планарных контактах на микротрещине, исследована щелевая структура пниктидов $CaKFe_4As_4$ (семейство 1144), переходящих в сверхпроводящее состояние в стехиометрическом составе при критической температуре $T_c \approx 36.1$ К. Показано сосуществование трех объемных параметров сверхпроводящего порядка Δ_i, при $T \ll T_c$ напрямую определены их амплитуды и соответствующие характеристические отношения $2\Delta_i(0)/k_BT_c \approx 5.6,\ 3.9$ и 1.3. Проведено сравнение щелевой структуры $CaKFe_4As_4$ и родственных пниктидов семейств 1144 и 122, исследованных нами ранее.

DOI: 10.31857/S1234567824100082, EDN: YHCKIA

1. Введение. Недавно открытое семейство 1144 сверхпроводящих (СП) пниктидов железа, типичным представителем которого является $CaKFe_4As_4$ [1], – полный стехиометрический аналог системы $BaFe_2As_2$ (так называемое семейство 122). Присутствие чередующихся вдоль c-направления неэквивалентных 122-блоков Ca-FeAs-K-FeAs-…, обладающих тетрагональной структурой, осуществляет дырочное "самодопирование" [2]. Таким образом, $CaKFe_4As_4$ переходит в СП состояние в стехиометрическом составе и обладает оптимальными от природы СП свойствами без присутствия нематических флуктуаций [3], а также не имея структурных и магнитных переходов вплоть до $T \sim 300$ К [4].

Зонные расчеты [5–7] показали, что на поверхности Ферми $CaKFe_4As_4$ присутствуют около 10 листов, из которых методом фотоэмиссионной спектроскопии углового разрешения надежно различимы пять: три дырочных цилиндра вокруг Г-точки зоны Бриллюэна и два электронных цилиндра в М-точке [7].

Ввиду отсутствия прямых измерений, данные литературы о щелевой структуре $CaKFe_4As_4$ на сегодня немногочислены и разрознены: нет единого мнения ни о количестве, ни о величинах СП параметров порядка. Например, разброс экспериментальных значений характеристического отношения $2\Delta_L(0)/k_BT_c$ для большой СП щели составляет 3.7–9.0 [7–11]. Оптическая спектроскопия [8] и измерения плотности СП конденсата $\rho_S(T)$ [9, 10] показали наличие двух СП щелей. С другой стороны, авторы работы [11] утверждают, что для аппроксимации $\rho_S(T)$ необходима 5-щелевая модель. Имеющиеся спектры туннельных контактов на основе $CaKFe_4As_4$ [9] демонстрируют сильно размытые щелевые особенности, которые могут быть описаны в рамках теоретических моделей только при вводе сильного разброса значений СП щелей в реальном пространстве (до 100 %).

В данной работе с помощью спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО) планарных контактов на микротрещине напрямую определены величины СП параметров порядка $CaKFe_4As_4$ при $T \ll T_c$ и их характеристические отношения. Показано сходство щелевой структуры $CaKFe_4As_4$ и его структурных аналогов: пниктидов $EuCsFe_4As_4$ семейства 1144 с магнитным переходом при $T < T_c$ и $Ba(Fe,Ni)_2As_2$, исследованных нами ранее.

2. Детали эксперимента. Синтез соединения состава $CaKFe_4As_4$ проводился из подготовленных заранее прекурсоров CaAs (Ca, 99.9 %, + As, 99.9999 %), KAs (K, 99.95 %, + As, 99.9999 %) и Fe_2As (Fe, 99.98 %, + As, 99.9999 %) в мольном соотношении 1:1:2. Прекурсор CaAs синтезировали в корундовом тигле из исходных реагентов Ca и As в ниобиевом контейнере в атмосфере аргона при температуре 800 °C в течение 48 ч. Прекурсор KAs синтезировали в агатовой ступке на плите при температуре 150 °C, постепенно добавляя порошок

1) e-mail: kuzmichevate@lebedev.ru

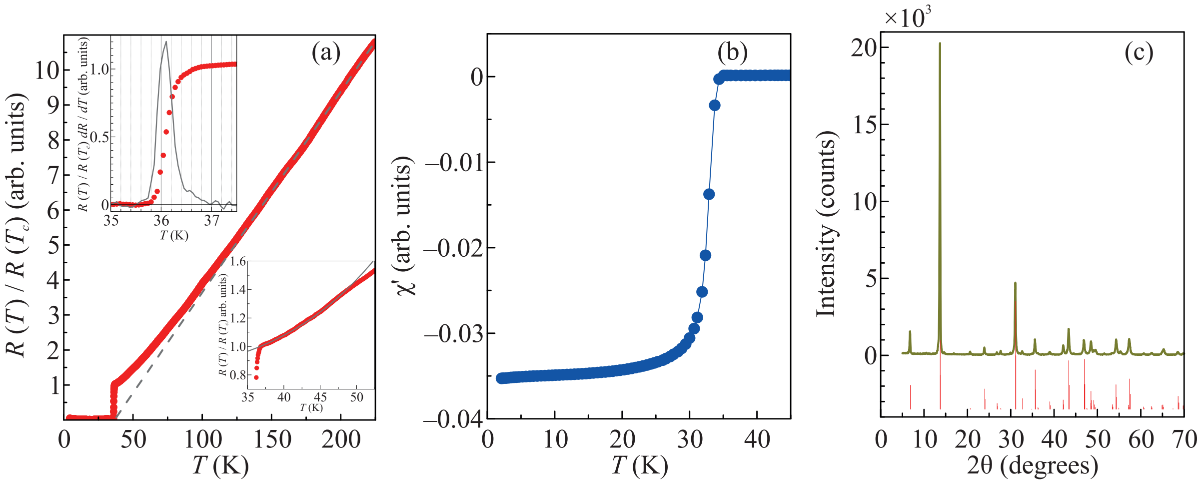

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Температурная зависимость сопротивления поликристалла $CaKFe_4As_4$. Штриховой линией показана аппроксимация $R(T)$ при высоких температурах. На верхней вставке показан СП переход (кружки), а также зависимость $dR(T)/dT$ (линия), максимум которой определяет объемную $T_c \approx 36.1$ K. (b) – Температурная зависимость действительной части магнитной восприимчивости. (c) – Порошковая дифрактограмма поликристалла $CaKFe_4As_4$ (сплошная линия) и ожидаемое положение пиков от фазы 1144 (вертикальные штрихи)

As в расплавленный K. Элементы Fe и As в виде дроби в стехиометрическом соотношении закладывали в кварцевую ампулу, после чего ампулу отжигали в печи при $T = 900\,^\circ$C в течение 96 ч. Синтезированные прекурсоры размалывали и перемешивали в агатовой ступке, полученную смесь засыпали в корундовый тигель, который заваривали в ниобиевый контейнер. Контейнер помещали в вакуумную печь и прокаливали в атмосфере аргона при температуре 890 °C в течение 6 ч. Полученный порошок перетирали в агатовой ступке и прессовали в таблетки диаметром 12 мм, которые затем помещали в ниобиевый контейнер и заваривали при помощи аргонодуговой сварки в атмосфере аргона. Контейнер помещали в вакуумную печь и прокаливали при температуре 890 °C в течение 6 ч в атмосфере аргона. Все операции синтеза, кроме прокаливания, были проведены в перчаточном боксе в атмосфере аргона и содержанием кислорода и воды менее чем 0.1 ppm.

Измерения температурной зависимости сопротивления, проведенные четырехточечным методом, показали достаточно резкий СП переход (рис. 1a), детали которого приведены на верхней вставке. Критическая температура объемного поликристалла $T_c^{\mathrm{bulk}} \approx 36.1$ K определена, исходя из положения максимума производной $dR(T)/dT$. Относительно небольшая ширина СП перехода $\Delta T_c \approx 0.8\,\mathrm{K} \approx 0.02T_c$, а также высокое отношение $R(225\,K)/R(T_c) \approx 11$ демонстрирует высокое качество образца и однородность его свойств. В соответствии с классической формулой Блоха–Грюнайзена, в нормальном состоянии в диапазоне $0.15T_D \lesssim T \lesssim 0.2T_D$ (при температуре Дебая $T_D \approx 250$ K [12], для $CaKFe_4As_4$, таким образом, $0.15T_D \approx T_c$) экспериментальная кривая $R(T)$ аппроксимируется степенной функцией $R \propto T^4 + \mathrm{const}$ (нижняя вставка к рис. 1a), а при высоких температурах $T \gtrsim 0.5T_D$ стремится к линейной зависимости (штриховая линия на рис. 2a). Структурный и магнитный переходы выше T_c отсутствуют.

Температурная зависимость магнитной восприимчивости на переменном токе (рис. 2b) содержит СП переход при $T_c \approx 35.1$ K и не имеет каких-либо особенностей ниже T_c. На порошковой дифрактограмме, показанной на рис. 2c, присутствуют только рефлексы, относящиеся к целевой фазе (см. штрихи красного цвета), и отсутствуют явные рефлексы примесных фаз, что говорит об однофазности синтезированного образца. Элементный состав полученного поликристаллического образца был исследован методом энергодисперсионной спектроскопии с помощью приставки INCA X-Act к электронному микроскопу JEOL 7001F. Массовое соотношение элементов Ca, K, Fe и As составило 6.29 %, 6.47 %, 37.42 % и 49.82 %, соответственно, что соответствует формуле $Ca_{0.94}K_{0.99}Fe_{4.01}As_{3.98}$.

С помощью техники “break-junction” [13] создавались механически регулируемые планарные контакты на микротрещине (MCPBJ) типа S-n-I-n-S (S – сверхпроводник, n – тонкий нормальный металл, I – изолятор). Конструкция измерительного столика и

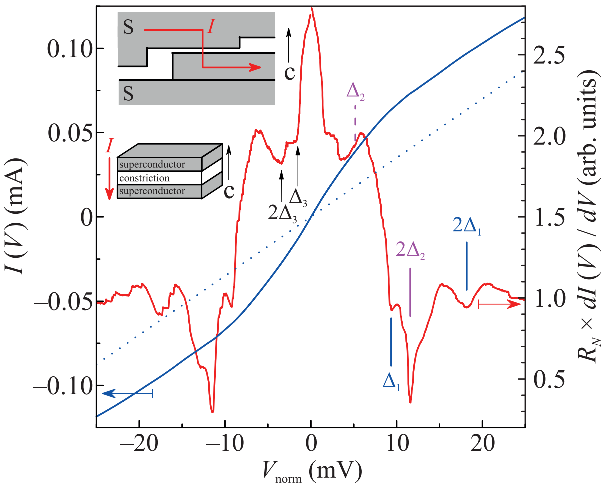

Рис. 2. (Цветной онлайн) ВАХ (линия синего цвета, левая вертикальная ось) и спектр динамической проводимости (линия красного цвета, правая ось) SnS-андреевского контакта, полученного в поликристалле $CaKFe_4As_4$ при $T \approx 2.5$ К. Пунктиром показана соответствующая омическая I(V)-зависимость при $T > T_c$. Монотонный ход $dI(V)/dV$ в нормальном состоянии подавлен для удобства рассмотрения. Вертикальным штрихами отмечены положения андреевских субгармоник от СП параметров порядка $\Delta_1 \approx 9.1$ мэВ и $\Delta_2 \approx 5.8$ мэВ, стрелками – от предположительной малой СП щели $\Delta_3 \approx 1.8$ мэВ при $T \ll T_c$. Штриховой вертикальной линией показано ожидаемое положение второй субгармоники от Δ_2. На вставке показана схема образования планарного контакта на микротрещине на ступеньках и террасах слоистого образца

детали эксперимента, преимущества и недостатки метода MCPBJ и его применимость к поликристаллам слоистых соединений подробно описаны в обзоре [14]. Метод заключается в прецизионном создании микротрещины в образце при 4.2 К с образованием двух криогенных сколов, разделенных туннельным барьером (ScS, где $c \equiv nIn$ – слабая связь).

Нами неоднократно было показано, что с помощью техники MCPBJ в поликристаллах слоистых соединений возможно раскалывание отдельных кристаллических зерен (в которых кристаллографическое ab-направление примерно параллельно микротрещине) с образованием ступенек и террас на поверхности таких зерен (подобные изображения, полученные с помощью электронного микроскопа, приведены на рис. 2 в [14], рис. 1 в [15]). В таком контакте (аналогично созданному в слоистом монокристалле) при тонкой механической регулировке можно ожидать скольжение криогенных сколов друг относительно друга вдоль террас в ab-плоскости с изменением площади и нормального сопротивления контакта R_N, а также образование стопочных структур ScSc-…-S – цепочки ScS-контактов с эквивалентным R_N (см. раздел 2.3 в [14]). При такой геометрии измерительный ток протекает через контакт вдоль c-направления. Физическая модель контакта, образованного на ступеньках и террасах слоистого кристалла, схематически приведена на вставке к рис. 2.

В СП состоянии в S-n-I-n-S-контакте реализуется эффект многократных андреевских отражений (МАО) [16–21]. В случае высокой прозрачности слоя изолятора I ($T \gtrsim 85\,\%$, что соответствует силе барьера $Z \lesssim 0.3$) и отсутствии фазовой когерентности между СП берегами (так называемый “длинный контакт”) [16, 17] андреевский транспорт вызывает на вольтамперной характеристике (ВАХ) контакта избыточный ток $I_{exc} \equiv I(V,T) - I(V,T_c)$ *во всем диапазоне смещений* eV (т.е. относительно нормальной ВАХ выше T_c). На $dI(V)/dV$-спектре такого контакта при $eV \to 0$ наблюдается повышенная (однако, конечная) динамическая проводимость относительно проводимости в нормальном состоянии $G_N \equiv 1/R_N$ (образуя так называемый пьедестал), при этом сверхтоковая ветвь отсутствует [16–21].

Амплитуда СП параметра порядка Δ напрямую определяется из положений минимумов субгармонической щелевой структуры (СГС) *при любых температурах* вплоть до T_c [16–20]:

$$|eV_n(T)| = 2\Delta(T)/n, \quad n = 1,\ 2,\ \ldots. \qquad (1)$$

Число наблюдаемых минимумов СГС уменьшается с увеличением параметра размытия Γ, а также при уменьшении баллистического отношения l/d (l – длина свободного пробега, d – размер контакта) [17, 21]. Для многощелевого сверхпроводника на $dI(V)/dV$-спектре будут присутствовать СГС от каждой щели.

Для слоистых материалов характерно образование не только одиночных ScS-контактов, но и стопочных структур ScSc-…-S [14]. На спектре стопки, состоящей из m последовательно подключенных *эквивалентных* ScS-контактов, положение СГС будет увеличено в m раз: $|eV_n(T)| = 2m\Delta(T)/n$, n, $m = 1,\ 2,\ \ldots$. Число контактов в стопке до $m \lesssim 15$ может быть однозначно определено с помощью набора статистики $I(V)$ и $dI(V)/dV$-характеристик различных стопок путем подбора *небольших целых* чисел m, на которые необходимо нормировать оси смещений $dI(V)/dV$-спектров так, чтобы положение всех особенностей, вызванных объемными СП свойствами, совпало (детали см. в [22, 23]). Аналогичная процедура была проведена для стопочных ScS-контактов, представленных ниже; для удобства, на рис. 2–4 ось смещений нормирована на полученные целые числа m ($V_{\rm norm} \equiv V/m$).

3. Экспериментальные данные. На рисунке 2 приведены типичные ВАХ и $dI(V)/dV$-спектр стопочного контакта на микротрещине ($m = 6$), получаемого в поликристаллах $CaKFe_4As_4$ при $T \ll \ll T_c$. ВАХ практически симметрична относительно нуля, не имеет сверхтоковой ветви и гистерезиса; вместо этого наблюдается заметный избыточный ток по сравнению с нормальной (омической) ВАХ для $T > T_c$ во всем диапазоне смещений. Указанные особенности $I(V)$-характеристики однозначно определяют реализацию некогерентного режима МАО и довольно высокую прозрачность барьера, согласно всем имеющимся моделям МАО [16, 18–20].

При рассмотрении $dI(V)/dV$-спектра на рис. 2 в сторону уменьшения смещения, первые два минимума, наблюдаемые при $|eV| \approx 18.2$ и 11.6 мэВ, являются фундаментальными ($n = 1$) андреевскими гармониками от СП параметров порядка $2\Delta_1 \approx 18.2$ мэВ и $\Delta_2 \approx 11.6$ мэВ при $T \ll T_c$ и составляют дублет. Следующий минимум при $|eV| \approx 9.1$ мэВ, согласно формуле (1), может быть интерпретирован как вторая ($n = 2$) субгармоника от Δ_1. Положения минимумов при малых смещениях $|eV| \approx 3.6$ и 1.8 мэВ (стрелки на рис. 2) не соответствуют субгармоникам высших порядков $n \geq 3$ от $\Delta_{1,2}$, поэтому могут быть интерпретированы как образующие вторую СГС, предположительно, от малой СП щели $2\Delta_3 \approx 3.6$ мэВ. Ожидаемое положение $n = 2$ субгармоники от $\Delta_2 \approx 5.8$ мэВ (штриховая линия на рис. 2) близко к позиции фундаментальной андреевской особенности при $2\Delta_3$, что, по всей вероятности, приводит к уширению последней и невозможности уверенно различить первую.

Набор нормированных ВАХ и $dI(V)/dV$-спектров (соответствующими цветами) различных стопочных контактов с $R_N \approx 40{-}230$ Ом, полученных при $T \ll \ll T_c$ в образцах $CaKFe_4As_4$ из одной закладки, показан на рис. 2 (данные красного цвета аналогичны приведенным на рис. 3). Хорошо видно, что несмотря на изменение R_N (которое можно оценить по наклону ВАХ при $eV \gg 2\Delta$) и, следовательно, площади контакта, положения дублетной фундаментальной андреевской гармоники, соответствующие СП параметрам порядка $2\Delta_1$ и $2\Delta_2$, воспроизводятся (вертикальные области светло-синего и фиолетового цвета на рис. 3b). Для двух нижних спектров ($m = 2, 3$) также воспроизводится и форма дублета. Таким образом, наблюдаемые особенности отражают объемные СП свойства $CaKFe_4As_4$. Отметим, что на спектрах, приведенных на рис. 3b, был подавлен монотон-

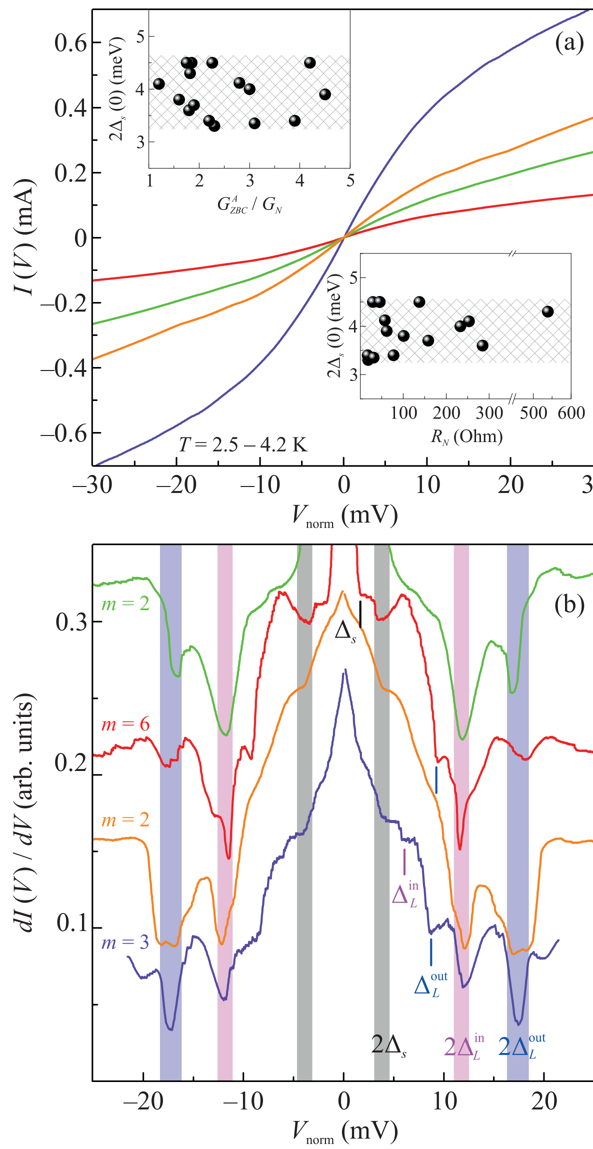

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – ВАХ и (b) – $dI(V)/dV$-спектры (приведены соответствующими цветами) андреевских SnS-контактов, полученных в поликристаллах $CaKFe_4As_4$ из одной закладки при $T \ll T_c$. Для каждого контакта ось смещений $I(V)$ и $dI(V)/dV$-характеристик нормирована на число контактов m, указанное на рисунке. Монотонный ход dI(V)/dV в нормальном состоянии подавлен для удобства рассмотрения. Вертикальные области отмечают воспроизводящиеся положения фундаментальных гармоник от СП параметров порядка Δ_1, Δ_2 и, предположительно, Δ_3; вертикальные штрихи – ожидаемые положения вторых субгармоник. На вставках к панели (a) показано положение особенности $dI(V)/dV$, интерпретированной как $2\Delta_3$, от андреевской проводимости при нулевом смещении $G^A_{ZBC} \equiv (G_{ZBC}/G_N - 1)$ (верхняя вставка) и нормального сопротивления контакта R_N (нижняя вставка)

ный ход путем деления на $dI(V)/dV$ в нормальном состоянии. Такая математическая процедура приводит к формальному выравниванию электронной плотности состояний вблизи уровня Ферми и приведению спектров к классическому виду.

Особенности, отмеченные на рис. 3b вертикальными штрихами, расположенные на вдвое меньших смещениях, чем соответствующие фундаментальные гармоники от Δ_1, Δ_2, Δ_3, и не превышающие их по амплитуде, с большой долей вероятности, являются вторыми ($n = 2$) субгармониками от данных СП щелей.

Согласно данным рис. 3b, $2\Delta_1 \approx 17.4 \pm 1.0$ мэВ, $2\Delta_2 \approx 12.1 \pm 0.9$ мэВ при $T \ll T_c$. Соответствующие характеристические отношения $r_i \equiv 2\Delta_i/k_B T_c^{\text{bulk}}$ составляют $r_1 \approx 5.6 \pm 0.3$, $r_2 \approx 3.9 \pm 0.3$ и превышают БКШ-предел слабой связи 3.53. Полученные величины r_1 и r_3 близки к оцененным в работах [9, 10] с помощью анализа температурной зависимости $\rho_S(T)$.

Особенности при малых смещениях $|eV| \approx \approx 3.8$ мэВ наблюдаются на большинстве полученных $dI(V)/dV$-спектров, хотя слабо выражены и имеют очень малую амплитуду. Эти особенности можно отнести к фундаментальной андреевской гармонике от малой СП щели $2\Delta_3$, руководствуясь следующими фактами. Во-первых, на $dI(V)/dV$-спектрах некоторых контактов также присутствует вторая $n = 2$ субгармоника, расположенная на вдвое меньшем смещении (в качестве примера см. рис. 2). Во-вторых, согласно полученной статистике на вставках к рис. 3a, положение рассматриваемой особенности (предполагаемая амплитуда $2\Delta_3$) не коррелирует ни с R_N контакта, ни с его андреевской проводимостью при нулевом смещении $G^A_{ZBC} \equiv (G_{ZBC}/G_N - 1)$ (G_{ZBC} – полная динамическая проводимость при $eV \to 0$), следовательно, не зависит от геометрических размеров контакта, и не может быть вызвано размерными резонансами.

Полученные величины $2\Delta_3 \approx 3.9 \pm 0.7$ мэВ, соответствующие диапазону характеристических отношений $r_3 \approx 1.3 \pm 0.3$, имеют гораздо больший разброс по сравнению с таковыми для $\Delta_{1,2}$. Вероятно, значительная относительная погрешность связана со слабой выраженностью данных особенностей на $dI(V)/dV$-спектрах SnS-контактов, либо со значительной вариацией силы межзонного взаимодействия от одной контактной точки к другой. В качестве возможных причин подавления СГС от предположительной Δ_3 можно указать малую длину свободного пробега, значительную амплитуду неупругого рассеяния Γ в зонах с этим СП параметром порядка и силу барьера $Z \sim 1$, низкую концентрацию носителей заряда в соответствующих зонах, а также анизотропию или даже наличие точек нулей Δ_3 в k-пространстве.

4. Обсуждение. Проведем сравнение структуры СП параметра порядка $CaKFe_4As_4$ и родственных соединений структурного типа 122, имеющих схожую топологию поверхности Ферми. Дублетные андреевские особенности на $dI(V)/dV$-спектрах, аналогичные наблюдаемым на рис. 2, 3, были получены нами ранее с помощью ЭНМАО-спектроскопии в пниктидах $EuCsFe_4As_4$ [24, 25] с магнитным переходом ниже T_c и $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ с вариацией степени допирования [23, 26, 27].

СП щелевая структура данных пниктидов схожа. На рисунке 4 приведены ВАХ и $dI(V)/dV$-спектры SnS-контактов на микротрещине, полученных в $CaKFe_4As_4$ (красного цвета, данные взяты с рис. 2), оптимально допированном $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ (желтого цвета, локальная критическая температура контакта $T_c^{\text{local}} \approx 20$ K) и $EuCsFe_4As_2$ (синего цвета, $T_c^{\text{local}} \approx 35$ K). Из-за различия в T_c и, соответственно, в энергии связи куперовских пар данных соединений, ось смещений для каждой $I(V)$ и $dI(V)/dV$-характеристики на рис. 4 нормирована на соответствующую величину большего СП параметра порядка Δ_1; ток нормирован на $I_0 \equiv \Delta_1/eR_N$ при $T \ll T_c$. Как видно из рис. 4b, при такой нормировке избыточный ток на ВАХ при $eV \gg 2\Delta$ стремится к постоянному значению (относительно штриховой линии $y = x$). Несмотря на изменение амплитуды избыточного андреевского тока при больших смещениях $I_{\text{exc}} \cdot eR_N \approx (0.3–2.3)\Delta_0$ (зависящее от свойств контактной области: l/d, Z и Γ), положение фундаментальных андреевских особенностей на соответствующих $dI(V)/dV$-спектрах от трех наблюдаемых СП параметров порядка воспроизводится (рис. 4a). Это указывает на примерно одинаковое соотношение $\Delta_1 : \Delta_2 : \Delta_3$ для всех исследованных соединений.

Два больших СП параметра порядка Δ_1 и Δ_2, составляющие дублет, могут относиться как к разным СП конденсатам (две отдельные изотропные СП щели $\Delta_{L1} \equiv \Delta_1$ и $\Delta_{L2} \equiv \Delta_2$, открывающиеся в разных зонах ниже T_c), так и к единому конденсату с $\Delta_L(\theta)$, обладающему анизотропией СП свойств в импульсном пространстве (θ – угол в k_xk_y-плоскости). В последнем случае $\Delta_1 \equiv \Delta_L^{\text{out}}$ и $\Delta_2 \equiv \Delta_L^{\text{in}}$ являются максимальной и минимальной энергиями связи куперовских пар в k-пространстве в зонах, где ниже T_c образуется данный анизотропный СП конденсат. Хотя для прямого установления анизотропии Δ_L в k-пространстве необходимо проведение более детальных исследований формы дублетов на $dI(V)/dV$-

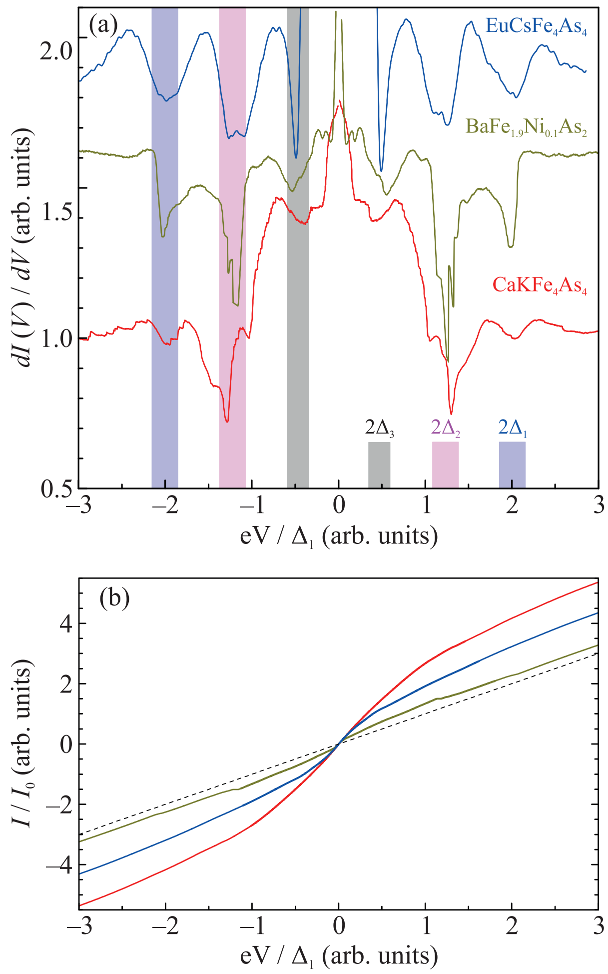

Рис. 4. (Цветной онлайн) Сравнение $dI(V)/dV$-спектров (a) и ВАХ (b) андреевских SnS-контактов, полученных нами в железосодержащих пниктидах стехиометрического типа 122: $EuCsFe_4As_4$ (синего цвета, данные взяты из работы [25]), оптимально допированном $BaFe_{1.9}Ni_{0.1}As_2$ (желтого цвета, данные взяты из [26]) и $CaKFe_4As_4$ (красного цвета, данные с рис. 2). Монотонный ход в нормальном состоянии на (a) подавлен для удобства рассмотрения. Вертикальные области отмечают положения фундаментальных гармоник от СП параметров порядка Δ_1, Δ_2 и Δ_3. Для каждого контакта ось смещений нормирована на соответствующее значение Δ_1, ось тока нормирована на $I_0 \equiv \Delta_1/eR_N$ при $T \ll T_c$. Прямая $y = x$ приведена на панели (b) штриховой линией для сравнения

спектрах SnS-контактов, в работах [23, 25] на основе анализа данных ЭНМАО-спектроскопии образцов $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ и $EuCsFe_4As_4$ приведен ряд косвенных аргументов в пользу данного предположения. В этом случае, оценка величины анизотропии большой СП щели в $CaKFe_4As_4$ дает величину $A_L \equiv \equiv 100\,\% \cdot [1 - \Delta_2/\Delta_1] \approx 30\,\%$.

Оцененные выше величины характеристических отношений для $CaKFe_4As_4$ также близки к r_i, определенным нами ранее в $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ [23, 26, 27] и $EuCsFe_4As_2$ [24, 25]. Сравнение СП свойств $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_2$ с близкими $T_c \approx 36{-}37\,K$ показало, что наличие магнитного упорядочения в Eu^{2+}-плоскостях $EuCsFe_4As_4$ слабо влияет на характеристические отношения энергетических СП параметров и механизм спаривания. Можно сделать вывод о сходстве свойств СП подсистем пниктидов $CaKFe_4As_4$ и $EuCsFe_4As_2$ семейства 1144 с таковыми для $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ родственного семейства 122 и реализации одновременного масштабирования (скейлинга) амплитуд Δ_i с T_c в исследованных сверхпроводниках.

5. Заключение. С помощью спектроскопии эффекта некогерентных многократных андреевских отражений, проведенной на планарных стопочных SnS-контактах на микротрещине, исследованы свойства СП подсистемы поликристаллов $CaKFe_4As_4$ с объемной критической температурой $T_c^{\text{bulk}} \approx 36.1\,K$. При $T \ll T_c$ напрямую определены амплитуды трех объемных СП параметров порядка Δ_1, Δ_2 и предположительной малой СП щели Δ_3 с характеристическими отношениями 5.6, 3.9 и 1.3, соответственно. Показано сходство СП свойств пниктидов $CaKFe_4As_4$, $EuCsFe_4As_2$ семейства 1144 и $BaFe_{2-x}Ni_xAs_2$ родственного семейства 122, а также реализация скейлинга амплитуд Δ_i с T_c в исследованных сверхпроводниках.

Авторы выражают благодарность К. С. Первакову и В. А. Власенко за полезные обсуждения. Измерения частично проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках проекта # 075–5-2021-1353 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. A. Iyo, K. Kawashima, T. Kinjo, T. Nishio, S. Ishida, H. Fujihisa, Y. Gotoh, K. Kihou, H. Eisaki, and Y. Yoshida, J. Am. Chem. Soc. **138**, 3410 (2016).
2. K. Kawashima, T. Kinjo, T. Nishio, S. Ishida, H. Fujihisa, Y. Gotoh, K. Kihou, H. Eisaki, Y. Yoshida, and A. Iyo, J. Phys. Soc. Jpn **85**, 064710 (2016).
3. W.-L. Zhang, W. R. Meier, T. Kong, P. C. Canfield, and G. Blumberg, Phys. Rev. B **98**, 140501(R) (2018).
4. W. R. Meier, T. Kong, U. S. Kaluarachchi, V. Taufour, N. H. Jo, G. Drachuck, A. E. Böhmer, S. M. Saunders,

A. Sapkota, A. Kreyssig, M. A. Tanatar, R. Prozorov, A. I. Goldman, F. F. Balakirev, A. Gurevich, S. L. Bud'ko, and P. C. Canfield, Phys. Rev. B **94**, 064501 (2016).
5. F. Lochner, F. Ahn, T. Hickel, and I. Eremin, Phys. Rev. B **96**, 094521 (2017).
6. D. V. Suetin and I. R. Shein, J. Supercond. Novel Magn. **31**, 1683 (2018).
7. D. Mou, T. Kong, W. R. Meier, F. Lochner, L.-L. Wang, Q. Lin, Y. Wu, S. L. Bud'ko, I. Eremin, D. D. Johnson, P. C. Canfield, and A. Kaminski, Phys. Rev. Lett. **117**, 277001 (2016).
8. R. Yang, Y. Dai, B. Xu, W. Zhang, Z. Qiu, Q. Sui, C. C. Homes, and X. Qiu, Phys. Rev. B **95**, 064506 (2017).
9. K. Cho, A. Fente, S. Teknowijoyo, M. A. Tanatar, K. R. Joshi, N. M. Nusran, T. Kong, W. R. Meier, U. Kaluarachchi, I. Guillamón, H. Suderow, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, and R. Prozorov, Phys. Rev. B **95**, 100502(R) (2017).
10. P. K. Biswas, A. Iyo, Y. Yoshida, H. Eisaki, K. Kawashima, and A. D. Hillier, Phys. Rev. B **95**, 140505(R) (2017).
11. R. Khasanov, W. R. Meier, Y. Wu, D. Mou, S. L. Bud'ko, I. Eremin, H. Luetkens, A. Kaminski, P. C. Canfield, and A. Amato, Phys. Rev. B **97**, 140503(R) (2018).
12. S. L. Bud'ko, T. Kong, W. R. Meier, X. Ma, and P. C. Canfield, Phil. Mag. **97**, 2689 (2017).
13. J. Moreland and J. W. Ekin, J. Appl. Phys. **58**, 3888 (1985).
14. S. A. Kuzmichev and T. E. Kuzmicheva, Low Temp. Phys. **42**, 1008 (2016).
15. T. E. Kuzmicheva, S. A. Kuzmichev, K. S. Pervakov, V. M. Pudalov, and N. D. Zhigadlo, Phys. Rev. B **95**, 094507 (2017).
16. M. Octavio, M. Tinkham, G. E. Blonder, and T. M. Klapwijk, Phys. Rev. B **27**, 6739 (1983).
17. R. Kümmel, U. Gunsenheimer, and R. Nicolsky, Phys. Rev. B **42**, 3992 (1990).
18. U. Gunsenheimer and A. D. Zaikin, Phys. Rev. B **50**, 6317 (1994).
19. G. B. Arnold, J. Low Temp. Phys. **68**, 1 (1987).
20. D. Averin and A. Bardas, Phys. Rev. Lett. **75**, 1831 (1995).
21. Z. Popović, S. A. Kuzmichev, and T. E. Kuzmicheva, J. Appl. Phys. **128**, 013901 (2020).
22. T. E. Kuzmicheva, S. A. Kuzmichev, and N. D. Zhigadlo, Phys. Rev. B **100**, 144504 (2019).
23. T. E. Kuzmicheva, S. A. Kuzmichev, K. S. Pervakov, and V. A. Vlasenko, Phys. Rev. B **104**, 174512 (2021).
24. S. A. Kuzmichev, K. S. Pervakov, V. A. Vlasenko, A. Yu. Degtyarenko, S. Yu. Gavrilkin, and T. E. Kuzmicheva, JETP Lett. **116**, 723 (2022).
25. T. Kuzmicheva, K. Pervakov, V. Vlasenko, A. Degtyarenko, and S. Kuzmichev, J. Supercond. Novel Magn. **37**, 379 (2024).
26. T. E. Kuzmicheva, S. A. Kuzmichev, K. S. Pervakov, V. A. Vlasenko, JETP Lett. **112**, 786 (2020).
27. T. E. Kuzmicheva, S. A. Kuzmichev, K. S. Pervakov, and V. A. Vlasenko, JETP Lett. **118**, 514 (2023).