**Туннельная спектроскопия пниктидов Ba(Fe,Ni)2As2 с вариацией степени допирования в нормальном состоянии**

***Никитченков И.А.1,2,\*, Кузьмичев С.А.1,2,***#***, Перваков К.С.2,***°***, Власенко В.А.2,***°°***,***

***Ильина А.Д.2,3,\*, Кузьмичева Т.Е.2,***#

\*студент, # старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., ° научный сотрудник, °° научный сотрудник, к.ф.-м.н.

*1 МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

*2 Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

*3 Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

*E-mail: nikitchenkov.ia19@physics.msu.ru*

Соединения Ba(Fe,Ni)2As2 имеют слоистую кристаллическую структуру, в которой сверхпроводящие (СП) блоки FeAs чередуются в *с*-направлении с плоскостями Ba. В стехиометрическом составе это соединение имеет дальний антиферромагнитный порядок. При электронном допировании антиферромагнетизм постепенно подавляется и возникает сверхпроводящая фаза, образующая «колокол», с максимальной критической температурой Тс ≈ 21 К [1]. На поверхности Ферми присутствуют дырочные зоны около Г-точки зоны Бриллюэна и электронные цилиндры около М-точки; последние часто рассматривают как единую эффективную электронную зону. Ожидается, что при температурах ниже Тс на электронных и дырочных листах поверхности Ферми образуется несколько СП конденсатов.

Мы исследовали монокристаллы BaFe2-xNixAs2 недо- и передопированных составов с *x* = 0.06 - 0.14 и Тс в диапазоне 12 – 21 К. В образцах при Т = 4.2 К с помощью техники «break junction» [2] создавались контакты на микротрещине типа сверхпроводник-барьер-сверхпроводник (ScS). Исследовались туннельные контакты в режиме, близком к баллистическому. Целью работы являлось исследование особенностей вольтамперных характеристик (ВАХ) и спектров динамической проводимости dI(V)/dV контактов в сверхпроводящем и нормальном состоянии.

Ниже Тс наблюдался эффект некогерентных многократных андреевских отражений (IMARE), вызывающий избыточный ток при любых смещениях eV, а также появление повышенной андреевской проводимости при нулевом смещении и щелевых минимумов при любых температурах вплоть до Тс [3]. При этом на ВАХ и dI(V)/dV наблюдалась не относящаяся к эффекту IMARE нелинейность, проявляющаяся как в СП, так и в нормальном состоянии (рис. 1а). Форма нелинейности dI(V)/dV схожа с «псевдощелью», наблюдаемой в высокотемпературных купратах. Установлено, что положения особенностей и форма нелинейности dI(V)/dV-спектров не зависят от температуры в диапазоне 4.3 – 50 К, не зависят от нормального сопротивления контакта и не могут быть объяснены перегревом контактной области при протекании измерительного тока.

Формы особенностей схожи при различной степени электронного допирования и Тс. Однако, при движении вдоль фазовой диаграммы меняются энергетические положения особенностей нелинейности на dI(V)/dV (рис. 1б). В передопированных составах (при удалении от АФМ и нематической фазе) положения eVmax, eVmin уменьшаются, при этом линейная экстраполяция в сторону увеличения степени замещения х предсказывает исчезновение данных особенностей и линеаризацию dI(V)/dV-спектра туннельного контакта в несверхпроводящем составе при *x* ≈ 0.22 [4]. Учитывая, что согласно нашим данным отношение 2ΔLout(0)/kTc ≈ 6 сохраняется в исследуемой области допирования примерно постоянным, поведение особенностей нормального состояния оказывается не связанным напрямую со сверхпроводящими свойствами исследуемого соединения.

Данные особенности нормального состояния воспроизводятся для всех исследованных контактов различного нормального сопротивления Rn. Показано, что нелинейная форма dI(V)/dV-спектров, представляющая собой максимум-минимум при смещениях eVmax, eVmin > 2Δ(0), не может быть вызвана геометрическими резонансами или структурой конкретного монокристалла (например, образованием двойников), а имеет, напротив, объемную природу, обусловленную внутренними свойствами материала [4].

Известно, что спектр туннельного NcN-контакта (N – нормальный металл) определяется распределением плотности электронных состояний N(E) вблизи уровня Ферми [5]. Наблюдаемый эффект может быть обусловлен особенностями плотности электронных состояний N(EF) ≈ const вблизи уровня Ферми вследствие топологии зонной структуры в Ba(Fe,Ni)2As2, наличия нематических флуктуаций и связанного с этим энергетического расщепления зон, образованных dxz/dyz-орбиталями железа [6], или перенормировки N(E) на взаимодействие с характерными бозонными модами [7].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\Илья\Desktop\Lomonosov 2025\graph - Lomonosov 2025 He.wmf | BFNAevol | |
| а | | б |
| Рис. 1. а) ВАХ (пунктир, правая ось) измеренная при T = 4.2 K и dI(V)/dV-спектры, измеренные в сверхпроводящем при T = 4.2 K (тонкая черная кривая, левая ось) и нормальном состоянии при T = 19 K > Tclocal ≈ 17.2 K(жирная серая кривая, левая ось) для SnS-контакта в монокристалле BaFe1.92Ni0.08As2 недодопированного состава. Серым столбцом в центре отмечены внутрищелевые области смещений, содержащие андреевские особенности от СП-параметров порядка. Вертикальными стрелками отмечены положения особенностей dI(V)/dV, сохраняющихся в нормальном состоянии – максимумов Vmax и минимумов Vmin. б) Зависимость положений максимума Vmax и минимума Vmin нелинейности, вызванной особенностями нормального состояния, от Tc и соответствующей ей степени допирования *x*. Рисунки взяты из работы [4]. | | |

**Литература**

1. *Xingye Lu.* Phase Diagram and Magnetic Excitations of BaFe2-xNixAs2: A Neutron Scattering Study.— Springer Theses, 2017.
2. *Кузьмичев С.А., Кузьмичева Т.Е.* // Физика низких температур. 2016. Т. 42. № 11. С. 1284–1310.
3. *Kuemmel R.* [et al.] // Phys. Rev. B. 1990. Vol. 42. P. 3992.
4. *И.А. Никитченков, С.А. Кузьмичев, А.Д. Ильина* [et al.] // ЖЭТФ. 2024. T. 166. C. 834.
5. *Giaever I., Megerle K.* // Phys. Rev. 1961. Vol. 112. P. 1101.
6. *T. Shimojima, T. Sonobe, W. Malaeb*, [et al.] // Phys. Rev. B. 2014. V. 89, P. 045101.
7. *Свистунов В.М., Белоголовский М.А., Черняк О.И.* // Успехи физических наук. 1987. Т. 151. С. 31.