

Туннельная и андреевская спектроскопия высокотемпературных сверхпроводников

Я.Г. Пономарев, С.А. Кузьмичев, М.Г. Михеев, М.В. Судакова, С.Н. Чесноков
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

Теоретические и экспериментальные исследования природы высокотемпературной сверхпроводимости далеки от завершения [1-8], тем не менее, за 18 лет изучения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) накоплен огромный фактический материал и построены теоретические модели для описания уникальных свойств ВТСП.

Методы туннельной и андреевской спектроскопии в применении к ВТСП показали достаточную эффективность и позволили получить ценную информацию о физических свойствах этих материалов в сверхпроводящем и нормальном состояниях.

Внутренний эффект Джозефсона: характерные свойства S-I-S-I- структуры

Одним из значительных достижений следует считать обнаружение и исследование в купратных сверхпроводниках внутреннего эффекта Джозефсона (ВЭД) [9, 10], который наглядно продемонстрировал 2D характер электронного транспорта в ВТСП.

Исследования внутреннего эффекта Джозефсона у ВТСП мезаструктур полностью подтвердили “S-I-S-I” модель: 1) при $T < T_c$ обнаружены многоветвевые вольт-амперные характеристики (ВАХ) мезаструктур при токе в с-направлении [9, 10], 2) на ВАХ мезаструктур обнаружены геометрические резонансы Фиске [11], 3) наблюдаются фраунгоферовы осцилляции критического джозефсоновского тока мезаструктур в функции внешнего магнитного поля [12] и 4) при пропускании через ВТСП мезаструктуры тока выше критического j_c обнаружено микроволновое излучение из мезаструктур [9, 10].

В работе [13] внутренний эффект Джозефсона у допированных монокристаллов Bi-2212 наблюдался на естественных ультратонких ступеньках (с высотой от 1,5 нм до 30 нм), которые всегда присутствуют на поверхности криогенных сколов (техника break junction). Обнаружена четко выраженная щелевая структура на ВАХ микроступенек у недопированных и оптимально допированных Bi-2212(La)- монокристаллов, а также у передопированных Bi-2212- монокристаллов и вискеров. Для стопки из n эквивалентных контактов величина щелевого смещения V_{gn} , соответствующего резкому росту квазичастичного тока $j_{qp} \parallel c$, определяется соотношением: $V_{gn} = (2\Delta/e)n$. Из экспериментальной зависимости $V_{gn}(n)$ можно определить щелевой параметр Δ с высокой точностью. Щелевая особенность на ВАХ имеет вид, типичный для “s- симметричного” (изотропного) щелевого параметра. На первый взгляд этот результат трудно совместить с данными фотоэмиссионной спектроскопии, соглас-

но которым щелевой параметр в **ab**- плоскости сильно анизотропен. Ситуация, однако, меняется в случае присутствия сингулярности ван Хофа на уровне Ферми. В работах [14, 15] было показано, что сингулярность ван Хофа существенно усиливает щелевую структуру на ВАХ контактов даже при сильной анизотропии щелевого параметра в **ab** – плоскости.

Джозефсоновская спектроскопия: возбуждение раман - активных (неполярных) оптических фононов переменным джозефсоновским током в диапазоне частот до 20 ТГц в ВТСП джозефсоновских контактах

К настоящему времени предложено большое количество теоретических моделей [2, 3, 5 - 7], в которых явление высокотемпературной сверхпроводимости описывается с помощью фононного механизма спаривания, дополненного учетом сильного кулоновского отталкивания.

Сильное электрон-фононное взаимодействие в ВТСП было подтверждено исследованиями эффекта возбуждения оптических раман - активных фононов переменным джозефсоновским током в ВТСП - джозефсоновских контактах [16, 17], данными фотоэмиссионной спектроскопии [18, 19], исследованиями изотопического эффекта [20, 21] и эффекта перенормировки квазичастичной плотности состояний при $T < T_c$ [22 - 24].

Полная теория, включающая взаимодействие со всеми оптическими модами (раман – активными и ИК - активными), развита в работе Максимова, Арсеева и Масловой [17]. В экспериментальной работе [16] было обнаружено взаимодействие переменного тока с раман – активными фононными модами во всем диапазоне фононных частот (до 20 ТГц), включая и моду апикального кислорода ($\epsilon_{фон} \approx 80$ мэВ). Дальнейшие экспериментальные исследования низкочастотных фононных резонансов (Bi - , Sr – и Cu – оптические моды) на ВАХ контактов на микротрещине (break junctions) в Bi-2201(La) монокристаллах показали, что переменный джозефсоновский ток возбуждает оптические фононы не только в SIS – контактах, но и в SNS – контактах, что однозначно подтвердило справедливость модели Максимова, Арсеева и Масловой [17].

Андреевская, туннельная и внутренняя туннельная спектроскопия: влияние допирования на сверхпроводящую щель Δ у висмутовых купратов.

Альтернативой фононному спариванию в ВТСП является спаривание на спиновых флуктуациях.

Сравнительно недавно было предположено, что недодопированные купратные ВТСП с магнетным спариванием характеризуются двумя щелевыми энергиями Δ_p и Δ_s [25]. Существующая в широком температурном интервале $T < T^*$ большая щель (псевдощель) Δ_p , измеряемая фотоэмиссионной или туннельной спектроскопией, характеризует энергию связи $2\Delta_p$ куперовских пар, остающихся в некогерентном состоянии при $T > T_c$ (T_c - критическая температура сверхпроводника). Меньшая щель Δ_s (сверхпроводящая щель), измеряемая андреевской или рамановской спектроскопией, определяет минимальную энергию $2\Delta_s$ возбуждения сверхпроводящего конденсата при $T < T_c$ ($T_c < T^*$ в недодопированных образцах). Согласно предложенной в работе [25] модели сверхпроводящая щель Δ_s меняется с концентрацией дырок p подобно T_c , проходя через максимум при оптимальном допировании (скейлинг между Δ_s и T_c). В то же время Δ_p монотонно растет при $p \rightarrow 0$. Существуют теоретические модели, в которых существование псевдощели Δ_p связывается с присутствием некогерентных куперовских пар при $T > T_c$, что должно приводить к появлению избыточного тока на ВАХ контактов S-N- и S-n-S- типов [26]. Экспериментальная проверка этого предсказания на N-S микроконтактах (золото-YBCO) дала негативный результат [27].

Подробные исследования с использованием туннельной, внутренней туннельной и андреевской спектроскопии, проведенные в работе [28], подтвердили модель скейлинга Δ_s и T_c [25].

Следует добавить, что у оптимально допированных образцов купратных семейств $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+\delta}$, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+\delta}$ и $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ ($1 \leq n \leq 3$) в [29] обнаружен линейный рост сверхпроводящей щели Δ в функции числа n CuO_2 -плоскостей в сверхпроводящих блоках. Напомним, что зависимость максимальной критической температуры $T_{c \text{ max}}$ от n у купратов не подчиняется простому линейному закону [30].

Настоящая работа частично финансировалась за счет средств, представленных Научным Советом Российской научно-технической программы "Актуальные направления в физике конденсированных сред". Работа частично поддержана грантом N 02-02-17915 (Российский Фонд Фундаментальных Исследований).

1. В.Л. Гинзбург. УФН 170 (2000) 619-630.
2. Е.Г. Максимов. УФН 170 (2000) 1033-1061.
3. M.L. Kulić. Phys. Rep. 338 (2000) 1.
4. Ю.А. Изюмов. УФН 169 (1999) 225-254.
5. А.А. Abrikosov. Physica C, 341-348 (2000) 97-102.
6. A.S. Alexandrov. cond-mat/0104413, 22 Apr 2001.
7. G. Varelogiannis. Physica C 317-318 (1999) 238-251.
8. D. Pines. Tr. J. of Physics 20 (1996) 535-547.

9. R. Kleiner, P. Müller. Physica C 293 (1997) 156-167.
10. A.A. Yurgens. Supercond. Sci. Technol. 13 (2000) R85-R100.
11. V.N. Krasnov, N. Mros, A. Yrgens, D. Winkler. Phys. Rev. B 59 (1999) 8463-8466.
12. T. Yamashita, S.-J. Kim, Y. Latyshev, K. Nakajima. Physica C 335 (2000) 219-225.
13. Ya.G. Ponomarev, Chong Soon Khi, Kim Ki Uk et al. Physica C 315 (1999) 85-90.
14. J.Y.T. Wei, C.C. Tsuei, P.J.M. van Bentum et al. Phys. Rev. B 57 (1998) 3650-3662.
15. P. I. Arseev, N.K. Fedorov, S.O. Loiko, arXiv: cond-mat/0304525 v1 23 Apr 2003.
16. Ya.G. Ponomarev, E.B. Tsokur, M.V. Sudakova, S.N. Tchesnokov, M.E. Shabalin, M.A. Lorenz, M.A. Hein, G. Müller, H. Piel, B.A. Aminov. Sol. State Comm. 111 (1999) 513-518.
17. E.G. Maksimov, P.I. Arseev, N.S. Maslova. Sol. State Comm. 111 (1999) 391-395.
18. A. Lanzara, P.V. Bogdanov, X.J. Zhou et al. cond-mat/0102227, Feb 2001.
19. Z. - X. Shen, A. Lanzara, N. Nagaosa. cond-mat/0102244 v2, 15 Feb 2001.
20. G.M. Zhao, M.B. Hunt, H. Keller, K.A. Muller. Nature (London) 385 (1997) 236.
21. J.P. Franck et al. Phys. Rev. B 44 (1991) 5318.
22. S.I. Vedenev et al. Physica C 235-240 (1994) 1851-1852.
23. D. Shimada, N. Tsuda, U. Paltzer, F.W. de Wette. Physica C 298 (1998) 195-202.
24. R.S. Gonnelli, G.A. Ummarino, V.A. Stepanov. Physica C 275 (1997) 162-171.
25. G. Deutscher. Nature 397 (1999) 410.
26. Han-Yong Choi, Yunkyu Bang, David K. Campbell. Phys. Rev. B 61 (2000) 9748.
27. Y. Dagan, A. Kohen, G. Deutscher, Revcolevschi. Phys. Rev. B 61 (2000) 7012.
28. Ya.G. Ponomarev et al. Inst. Phys. Conf. 167 (2000) 241-244.
29. Ya.G. Ponomarev et al. Inst. Phys. Conf. 167 (2000) 245-248.
30. J.C. Phillips. Phys. Rev. Lett., 72 (1994) 3863-3866.