

имеют один и тот же знак и, следовательно, нет $0 - \pi$ -перехода [35]. Как видно из (2), $0 - \pi$ -переход при изменении φ возникает, если $J^{(p)}(T)$ и $J^{(a)}(T)$ имеют противоположные знаки. Только в этом случае критический джозефсоновский ток немонотонно зависит от φ .

На основе найденного $0 - \pi$ -перехода при изменении угла разориентировки можно предложить своего рода переключатель контакта из π -состояния в 0 -состояние при фиксированной температуре. Действительно, если коэрцитивная сила в одном из ферромагнитных слоев заметно больше, чем в другом, можно изменять взаимную ориентацию намагниченностей, включая внешнее магнитное поле и поворачивая его на некоторый угол, а затем выключая это поле. При этом величина поля должна быть подобрана так, чтобы оно могло вращать намагниченность только у одного ферромагнитного слоя, имеющего меньшую коэрцитивную силу.

Работа была поддержана грантами РФФИ № 02-02-16643, ОФН РАН, Министерства науки и образования РФ (Ю.С.Б. и И.В.Б.), фондом "Династия" (И.В.Б.) и Forschungszentrum Jülich (Landau Scholarship; И.В.Б.). Т. Копп благодарит за финансовую поддержку грант SFB 484 и проект BMBF № 13N6918A.

Список литературы

1. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **31** 202 (1956)
2. Булаевский Л Н, Кузий В В, Собянин А А *Письма в ЖЭТФ* **25** 314 (1977)
3. Буздин А И, Булаевский Л Н, Панюков С В *Письма в ЖЭТФ* **35** 147 (1982)
4. Van Harlingen D J *Rev. Mod. Phys.* **67** 515 (1995)
5. Tsuei C C, Kirtley J R *Rev. Mod. Phys.* **72** 969 (2000)
6. Ryazanov V V et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 2427 (2001)
7. Kontos T et al. *Phys. Rev. Lett.* **89** 137007 (2002)
8. Guichard W et al. *Phys. Rev. Lett.* **90** 167001 (2003)
9. Bauer A et al. *Phys. Rev. Lett.* **92** 217001 (2004)
10. Буздин А И, Вуйич Б, Куприянов М Ю *ЖЭТФ* **101** 231 (1992)
11. Кошина Е А, Криворучко В Н *Письма в ЖЭТФ* **71** 182 (2000); Koshina E, Krivoruchko V *Phys. Rev. B* **63** 224515 (2001)
12. Golubov A A, Kupriyanov M Yu, Fominov Ya V *Письма в ЖЭТФ* **75** 223 (2002)
13. Golubov A A, Kupriyanov M Yu, Fominov Ya V *Письма в ЖЭТФ* **75** 709 (2002); **76** 268 (2002)
14. Terzioglu E, Beasley M R *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **8** (2) 48 (1998)
15. Schulz R R et al. *Appl. Phys. Lett.* **76** 912 (2000)
16. Ioffe L B et al. *Nature* **398** 679 (1999)
17. Blatter G, Geshkenbein V B, Ioffe L B *Phys. Rev. B* **63** 174511 (2001)
18. Ларкин А И, Овчинников Ю Н *ЖЭТФ* **47** 1136 (1964)
19. Fulde P, Ferrell R A *Phys. Rev.* **135** A550 (1964)
20. Tedrow P M, Tkaczyk J E, Kumar A *Phys. Rev. Lett.* **56** 1746 (1986)
21. Hao X, Moodera J S, Meservey R *Phys. Rev. B* **42** 8235 (1990)
22. Tokuyasu T, Sauls J A, Rainer D *Phys. Rev. B* **38** 8823 (1988)
23. Fogelström M *Phys. Rev. B* **62** 11812 (2000)
24. Barash Yu S, Bobkova I V *Phys. Rev. B* **65** 144502 (2002)
25. Chitchev N M et al. *Письма в ЖЭТФ* **74** 357 (2001)
26. Cuevas J C, Fogelström M *Phys. Rev. B* **64** 104502 (2001)
27. Furusaki A, Tsukada M *Physica B* **165–166** 967 (1990)
28. Furusaki A, Tsukada M *Phys. Rev. B* **43** 10164 (1991)
29. Beenakker C W J, van Houten H *Phys. Rev. Lett.* **66** 3056 (1991)
30. Gorelik L Y et al. *Phys. Rev. Lett.* **75** 1162 (1995)
31. Gorelik L Y et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 2538 (1998)
32. Lundin N I *Phys. Rev. B* **61** 9101 (2000)
33. Barash Yu S, Bobkova I V, Kopp T *Phys. Rev. B* **66** 140503(R) (2002)
34. Krivoruchko V N, Koshina E A *Phys. Rev. B* **64** 172511 (2001)
35. Bergeret F S, Volkov A F, Efetov K B *Phys. Rev. Lett.* **86** 3140 (2001); *Phys. Rev. B* **64** 134506 (2001)

PACS numbers: **74.20. - z, 74.72. - h**

Высокотемпературная сверхпроводимость сегодня

Е.Г. Максимов

В данном сообщении кратко изложены основные идеи по проблемам, обсуждавшимся в докладе.

Во-первых, на основе экспериментальных данных по оптике и фотоэмиссии с угловым разрешением (ARPES) показано, что стандартная фазовая диаграмма ВТСП-соединений содержит совершенно некорректное представление числа носителей по оси абсцисс. В частности, на этих диаграммах оптимальное число носителей x , отвечающее максимальному значению T_c , принимается равным 0,16 дырок на элементарную ячейку. В действительности, как следует из сравнения экспериментальных данных, полученных из ARPES-измерений [1], с теоретическими расчетами [2], реальное число носителей в оптимально допированных системах существенно больше. Оно отвечает скорее числу носителей, равному $1 - x = 0,84$. Более того, согласно результатам оптических измерений [3–5] и ARPES-экспериментов [1] полное число носителей в области существования сверхпроводящей фазы меняется в значительно меньших масштабах, чем это следует из стандартной фазовой диаграммы. Все эти данные показывают, что ВТСП-системы, обладающие сверхпроводимостью, достаточно далеки от допированного моттовского диэлектрика.

При уменьшении допирования ниже оптимального уровня в системе происходят существенные изменения электронной структуры и появляется анизотропная псевдощель. Масштаб этой псевдощели при малых уровнях допирования (но в области существования сверхпроводимости) может значительно превышать масштаб сверхпроводящей щели, но он много меньше по сравнению с диэлектрической щелью в отсутствие допирования. Существует целый ряд экспериментальных свидетельств [6] о наличии в спектре электронных возбуждений некой псевдощели, приводящей, в частности, к понижению плотности состояний на поверхности Ферми. Природа псевдощели до сих пор является объектом многочисленных дискуссий; более того, и в экспериментальном плане имеется целый ряд противоречивых наблюдений. Так, никаких следов псевдощели не обнаружено в большинстве туннельных экспериментов [7]. Отсутствуют также изменения в оптических правилах сумм, которые бы свидетельствовали о перераспределении электронных состояний из области псевдощели в область более высоких энергий [4]. В последнее время эксперименты [8–10] по сканирующей туннельной спектроскопии (STS) внесли новый и достаточно неожиданный аспект в проблему псевдощели. Было показано, что в недодопированных сверхпроводящих купратах существует пространственное разделение областей, в которых наблюдается псевдощель и сверхпроводящая щель. Возможность подобного расслоения в полупроводниковых антиферромагнитных системах с допированием была давно предсказана Нагаевым [11]. Расслоение в сверхпроводящих купратах, однако, не укладывается в такую простую схему, поскольку оно наблюдается и при достаточно высоких уровнях допирования, когда отсутствуют какие-либо следы антиферромагнетизма.

В докладе при обсуждении свойств нормального состояния основное внимание уделено появившимся недавно экспериментальным доказательствам существования в сверхпроводящих купратах достаточно сильного электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ). В ARPES-экспериментах измерены дисперсии электронных возбуждений, т.е. зависимость электронных возбуждений от импульса, и обнаружена перенормировка массы электрона за счет его взаимодействия с какими-то бозонами, энергии которых порядка фононных. Возникла довольно интенсивная дискуссия о природе этих бозонов. В работах [13, 14] убедительно доказано, что природа перенормировки массы электрона в сверхпроводящих купратах связана именно с ЭФВ. Константа связи электронов с фононами, определенная в этих работах, достаточно велика и составляет величину порядка 1, причем она уменьшается с ростом уровня допирования. Ранее свидетельства о существовании сильного ЭФВ были получены из обработки экспериментальных данных по оптическим спектрам ВТСП-систем. Эти результаты, подробно изложенные в нашем предыдущем обзоре [15], показывают, что ЭФВ следует принимать во внимание в любой последовательной теории сверхпроводимости в ВТСП-системах.

Одним из наиболее серьезных достижений в исследовании природы сверхпроводящего состояния в купратах, полученных за время, прошедшее с момента публикации обзора [15], стало экспериментальное доказательство близости сверхпроводимости в ВТСП-системах к модели Бардина–Купера–Шриффера (БКШ). В экспериментах по STS [9] и ARPES [16] были измерены спектры возбуждений квазичастиц в сверхпроводящем состоянии и показано, что эти возбуждения представляют собой когерентную смесь электронов и дырок. Именно такой тип возбуждения квазичастиц был полу-

чен Боголюбовым [17] из точной диагонализации гамильтониана модели БКШ. Это не означает, конечно, что сверхпроводящее состояние в купратах абсолютно тождественно простой модели БКШ. Как мы знаем, сверхпроводящий параметр порядка в купратах является, во-первых, сильно анизотропным. Во-вторых, поскольку в этих системах имеется, как это было продемонстрировано выше, сильное ЭФВ, параметр порядка зависит также от энергии и существует конечное время жизни у куперовских пар. К сожалению, последовательной и реалистической теории сверхпроводимости, учитывающей все эти факторы, пока не существует. Предстоят дальнейшие и, будем надеяться, интересные и плодотворные поиски в этом направлении.

Список литературы

1. Campuzano J C, Norman M R, Randeria M, in *The Physics of Superconductors* Vol. 2 (Eds K-H Bennemann, J B Ketterson) (Heidelberg: Springer-Verlag, 2004)
2. Pickett W E *Rev. Mod. Phys.* **61** 433 (1989)
3. Uchida S et al. *Phys. Rev. B* **43** 7942 (1991)
4. Santander-Syro A F et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 097005 (2002)
5. Molegraaf H J A et al. *Science* **295** 2239 (2002)
6. Timusk T, Statt B *Rep. Prog. Phys.* **62** 61 (1999)
7. Пономарев Я Г, Максимов Е Г *Письма в ЖЭТФ* **76** 455 (2002)
8. Pan S H et al. *Nature* **413** 282 (2001)
9. McElroy K et al. *Nature* **422** 592 (2003)
10. McElroy K et al., cond-mat/0404005
11. Нараев Э Л *Письма в ЖЭТФ* **16** 558 (1972)
12. Lanzara A et al. *Nature* **412** 510 (2001)
13. Cuk T et al., cond-mat/0403521
14. Zhou X J et al., cond-mat/0405130
15. Максимов Е Г *УФН* **170** 1033 (2000)
16. Matsui H et al. *Phys. Rev. Lett.* **90** 217002 (2003)
17. Боголюбов Н Н, Толмачев В В, Ширков Д В *Новый метод в теории сверхпроводимости* (М.: Изд-во АН СССР, 1958)