

УДК 537.362

СВЕРХСТРУКТУРНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ И НЕСТИНГ В ОКСИДНЫХ ВТСП СИСТЕМАХ

Н. В. Аншукова, А. И. Головашкин, Л. И. Иванова, А. П. Русаков

Обсуждается влияние сверхструктурного упорядочения в оксидных ВТСП системах на форму поверхности Ферми при легировании. Показано, что с учетом такого упорядочения в ВТСП может реализоваться механизм сверхпроводимости типа БКШ с высокими критическими температурами.

Несмотря на многочисленные исследования, конкретный механизм высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и специфическая форма поверхности Ферми в оксидных ВТСП до сих пор являются предметом широкой научной дискуссии. Ниже на основе экспериментальных данных обсуждаются причины особой формы поверхности Ферми оксидных ВТСП и их высоких критических температур.

Для понимания причин возникновения особой формы поверхности Ферми необходимо вначале рассмотреть образование диэлектрического состояния в этих системах. Ранее [1], на основе экспериментальных структурных и электронных данных, нами было показано, что в диэлектрической фазе купратных ВТСП существует волна зарядовой плотности (ВЗП) в подрешетке кислорода в плоскостях CuO_2 помимо известной волны спиновой плотности (ВСП) в медной подрешетке. Другими словами, в диэлектрической фазе оксидных ВТСП существует сверхструктурное упорядочение ионов кислорода с разным зарядовым состоянием или, точнее, упорядочение "ковалентных" связей $Cu-O^{-1.5}$ и "ионных" связей $Cu-O^{-2}$ [1]. При этом антиферромагнитное спиновое упорядочение происходит в направлении $[110]$, а зарядовое (кислородное) – в направлении $[100]$. Это приводит к удвоению периодов решетки в плоскости CuO_2 .

Решетке с удвоенным периодом соответствуют новые зоны Бриллюэна, показанные для иллюстрации на рис. 1 для простого случая плоской квадратной решетки CuO_2 . Координаты точек на рис. 1 указаны в единицах π/a , где a – расстояние между ближайшими ионами меди. Из-за удвоения периодов решетки возникает новый вектор трансляции

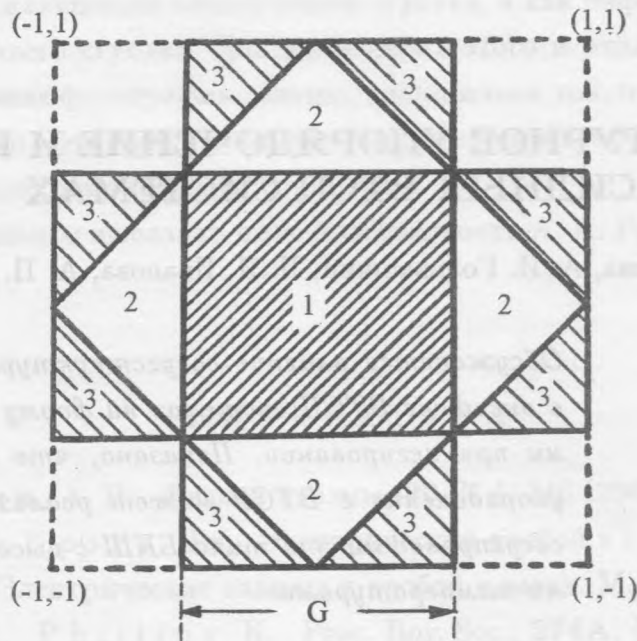


Рис. 1. Три первые зоны Бриллюэна для плоской квадратной решетки CuO_2 с удвоенным периодом $2a$ (отмечены цифрами 1, 2, 3). Пунктиром показана первая зона Бриллюэна для решетки без удвоения периода. Точки обозначены числами в единицах π/a . $\mathbf{G} = (\pi/a) [100]$ – вектор обратной решетки.

обратной решетки $\mathbf{G} = (\pi/a) [100]$, показанной на рис. 1. В модели "упорядоченных ковалентных связей" [1] показано, что в такой удвоенной ячейке в диэлектрике имеются четыре ковалентные связи $\text{Cu-O}^{-1.5}$. Эти 1.5 электрона от четырех соответствующих ионов кислорода на ячейку заполняют три первые зоны Бриллюэна. Дополнительное рассеяние на новый вектор \mathbf{G} приводит к образованию большой запрещенной энергетической щели $W \sim 2 \text{ эВ}$. Таким образом, возникает исходное диэлектрическое состояние.

Рассмотрим влияние легирования на форму поверхности Ферми ВТСП. При дырочном легировании и вырождении носителей заряда возникает поверхность Ферми, расположенная в купратах вдоль границ третьей зоны Бриллюэна. Это связано с относительно слабой зависимостью энергии от волнового вектора вдоль направлений $[100]$ вблизи границ третьей зоны Бриллюэна. Таким образом, специфическая форма поверхности Ферми оксидных ВТСП задается формой границ третьей зоны Бриллюэна (рис. 2а). Из рисунка видно, что поверхность Ферми проходит в основном внутри третьей зоны Бриллюэна, за исключением окрестности точек $(1/2, 1/2)$, где она попадает во

систем.

Возвращаясь к случаю слабого и оптимального легирования (рис. 2а), необходимо отметить, что поскольку границы третьей зоны Бриллюэна параллельны направлениям [100], то поверхность Ферми содержит большие участки, параллельные этим направлениям. Наличие конгруэнтных участков поверхности Ферми с вектором нестинга q_n (рис. 2а) объясняет наблюдаемое на эксперименте аномальное смягчение частот ω_{LO} продольных оптических фононов (" ω_{LO} -аномалия") [6, 7] в направлениях [100] в металлической фазе оксидных ВТСП. Обсуждавшееся выше сверхструктурное упорядочение (ВЗП в кислородной подрешетке) приводит к изменению электрон-ионного взаимодействия, которое стабилизирует решетку. Такая дополнительная "электронная" стабилизация системы за счет ВЗП проявляется в аномальности ряда физических свойств ВТСП систем (отрицательном тепловом расширении при низких температурах, влиянии на него магнитного поля, зависимости от уровня легирования кинетических свойств и т.д.) [8 – 10]. Влияние ВЗП на стабилизацию неустойчивых кристаллических структур впервые теоретически было рассмотрено в работах [11, 12].

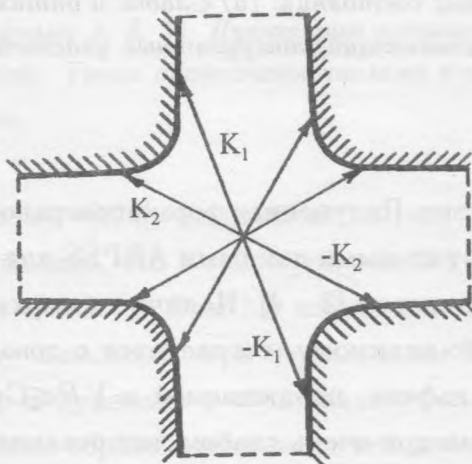


Рис. 3. Образование электронных пар с нулевым суммарным импульсом. Стрелками показаны примеры состояний электронов, образующих такие пары. Сечение поверхности Ферми показано сплошными линиями.

Специфическая форма поверхности Ферми оксидных ВТСП, показанная на рис. 2а, приводит к модифицированному варианту сверхпроводящего спаривания носителей заряда по типу БКШ. Схема такого спаривания приведена на рис. 3, где стрелками пока-

заны состояния пар электронов с нулевым суммарным импульсом. В качестве примера электронные состояния двух пар обозначены векторами $(\mathbf{k}_1, -\mathbf{k}_1)$ и $(\mathbf{k}_2, -\mathbf{k}_2)$. В отличие от традиционной модели БКШ со сферой Ферми, в нашем случае при рассеянии не сохраняется модуль вектора \mathbf{k} , хотя суммарный импульс пары остается равным нулю. В такой геометрии поверхности Ферми объем фазового пространства для рассеяния электронов несколько больше, чем для сферической поверхности Ферми. Участие в спаривании коротковолновых бозонов (фононов) с импульсом $\mathbf{q} = \mathbf{Q} + \mathbf{G}$, где \mathbf{Q} – квазиимпульс бозона (фонона), а $|\mathbf{G}| \neq 0$, обуславливает малую длину когерентности электронных пар.

Высокая температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c оксидных ВТСП определяется несколькими факторами. Во-первых, высокой плотностью электронных состояний на уровне Ферми $N(E_F)$. Состояния у поверхности Ферми оксидных ВТСП – это кислородные состояния в узкой (0.4 – 0.5 эВ) кислородной зоне. Эта зона образуется в результате сверхструктурного упорядочения "ковалентных" и "ионных" связей *Сu-O*. Слабое перекрытие орбиталей ионов кислорода $O^{-1.5}$ и приводит к узкой зоне и большой плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми. Большая плотность состояний $N(E_F)$ способствует достижению высоких значений константы электрон-фононной связи λ , которая в типичных оксидных ВТСП достигает величины 2 – 3. Во-вторых, высокими эффективными фононными частотами ω_{ph} . Эти частоты определяются легкими ионами кислорода. Соответствующие энергии $\hbar\omega_{ph}$ находятся в интервале 70 – 90 мэВ. Учитывая оба этих фактора, легко получить для величины T_c оценку 100 – 200 К. Таким образом, даже в модели БКШ в оксидных ВТСП может реализоваться высокотемпературная сверхпроводимость с $T_c \approx 100 - 200$ К, наблюдаемая на эксперименте.

Работа поддерживается Научным советом ГНТП "Актуальные направления в физике конденсированных сред" (направление "Сверхпроводимость").

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Golovashkin A. I., Anshukova N. V., Ivanova L. I., Rusakov A. P. *Physica*, **C317-318**, 630 (1999).
- [2] Ino A., Kim C., Mizokawa T., et al. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **68**, 1496 (1999).
- [3] Chuang Y.-D., Gromko A. D., Dessau D. S., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 3717 (1999).

- [4] Schabel M. C., Park C.-H., Matsuura A., et al. Phys. Rev., **B57**, 6090, 6107 (1998).
- [5] Быков А. И., Головашкин А. И., Долотенко М. И., и др. Письма в ЖЭТФ, **61**, 101 (1995).
- [6] McQueeney R. J., Petrov Y., Egami T., et al. Phys. Rev. Lett., **82**, 628 (1999).
- [7] Pintschovius L., Braden M. Phys. Rev., **B60**, R15039 (1999).
- [8] Anshukova N. V., Golovashkin A. I., Ivanova L. I., et al. Intern. J. Mod. Phys., **B12**, 3251 (1998).
- [9] Якубовский А. Ю., Гуденко С. В., Аншукова Н. В., и др. ЖЭТФ, **115**, 1326 (1999).
- [10] Аншукова Н. В., Головашкин А. И., Иванова Л. И., и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 30 (1999).
- [11] Максимов Е. Г. Труды ФИАН, **86**, 101 (1975).
- [12] Проблема высокотемпературной сверхпроводимости, ред. Гинзбург В. Л., Киржниц Д. А. М., Наука, 1977.

Поступила в редакцию 13 июня 2000 г.