

Российская академия наук  
Физический институт им. П.Н. Лебедева

**ЧЕТВЕРТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
СВЕРХПРОВОДИМОСТИ»**

**ФПС'11**

*3-7 Октября 2011 года  
г. Звенигород*

**СБОРНИК РАСШИРЕННЫХ ТЕЗИСОВ**

Москва ФИАН 2011

## Электронные свойства сверхпроводников с межзонно - внутризонным типом спаривания и гибридных наноструктур на их основе

А. В. Бурмистрова, С. В. Бакурский, А. В. Семенов, И. А. Девятков<sup>1)</sup>, М. Ю. Куприянов

*Научно-исследовательский институт ядерной физики,  
Московский государственный университет, Москва, 119899 Россия*

Теоретически рассмотрены электронные свойства сверхпроводников с учетом как внутризонного, так и межзонного спаривания. Рассчитана температурная зависимость параметра порядка пространственно - однородного сверхпроводника с таким типом спаривания. Теоретически рассмотрен электронный транспорт через границу нормального металла и двухзонного сверхпроводника с межзонно - внутризонным типом спаривания. Рассчитаны температурные и фазовые зависимости джозефсоновского тока в контактах двухзонных сверхпроводников с межзонно - внутризонным типом спаривания.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в железосодержащих пниктидах [1] возобновило интерес к исследованию необычных видов сверхпроводящего спаривания. Численные расчеты, учитывающие симметрию кристаллической решетки пниктидов [2, 3], показали, что данные материалы являются многозонными металлами с как внутризонным, так и с межзонным типом спаривания. Предлагаемая в работах [2, 3] теоретическая модель межзонно - внутризонного сверхпроводящего спаривания не противоречит популярной  $s_{\pm}$  модели симметрии параметра порядка [4], а является ее обобщением, учитывающим неизбежно имеющее место в сверхпроводниках с гибридизированными электронными состояниями межзонное спаривание.

При анализе электронных свойств сверхпроводников с межзонно - внутризонным типом спаривания мы будем исходить из следующего гамильтониана [2, 3] (смотри также [5]):

$$\begin{aligned}
 H &= \sum_j \int d^3r \{H_{0,j}(\mathbf{r}) + H_{\Delta,j}(\mathbf{r}) + H_{V,j}(\mathbf{r})\}, \\
 H_{0,j}(\mathbf{r}) &= \sum_{\alpha} \psi_{\alpha,j}^{\dagger}(\mathbf{r}) \hat{\epsilon}_j \psi_{\alpha,j}(\mathbf{r}), \\
 H_{V,j}(\mathbf{r}) &= \frac{1}{2} V(\mathbf{r}) \sum_{\alpha,\beta} (i\sigma_y)_{\alpha,\beta} \psi_{\alpha,j}^{\dagger}(\mathbf{r}) \psi_{\beta,3-j}^{\dagger}(\mathbf{r}) + h.c., \\
 H_{\Delta,j}(\mathbf{r}) &= \frac{1}{2} \Delta(\mathbf{r}) \sum_{\alpha,\beta} (i\sigma_y)_{\alpha,\beta} \psi_{\alpha,j}^{\dagger}(\mathbf{r}) \psi_{\beta,j}^{\dagger}(\mathbf{r}) + h.c.,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где индекс  $j = 1, 2$  нумерует зоны пниктида,  $\alpha(\beta) = \uparrow, \downarrow$  - проекции спина,  $\sigma_y$  - матрица Паули,  $\psi_{\alpha,j}^{\dagger}(\mathbf{r})(\psi_{\alpha,j}(\mathbf{r}))$  - полевой оператор рождения(уничтожения) квазичастицы в точке с координатой  $\mathbf{r}$ , принадлежащей  $j$ -ой зоне и имеющей проекцию спина  $\alpha$ ,  $\hat{\epsilon}_j = \left(-\frac{\nabla^2}{2m_j} - E_F - W(\mathbf{r})\right)$  - одночастичный оператор энергии квазичастицы  $j$ -ой зоны,  $E_F$  - энергия Ферми,  $m_j$  - эффективная масса квазичастицы в  $j$ -ой зоне,  $W(\mathbf{r})$  - независимый от спина потенциал,  $\Delta(\mathbf{r})$  - параметр порядка внутризонного спаривания,  $V(\mathbf{r})$  - параметр порядка межзонного спаривания,  $h.c.$  обозначает эрмитово сопряжение. Первое слагаемое в фигурных скобках в (1)  $H_{0,j}(\mathbf{r})$  описывает одночастичный гамильтониан  $j$ -ой зоны, второе слагаемое  $H_{\Delta,j}(\mathbf{r})$  описывает внутризонное спаривание, а третье слагаемое  $H_{V,j}(\mathbf{r})$  описывает межзонное спаривание [2, 3].

Исходя из гамильтониана (1) нами были получены уравнения Боголюбова, соответствующие рассматриваемому случаю межзонно - внутризонного спаривания, рассчитаны новые выражения для коэффициентов Боголюбова, отличные как от коэффициентов теории БКШ, так и от коэффициентов, отвечающих случаю только межзонного спаривания [6], определены физически допустимые состояния, соответствующие прошедшим через S-N (сверхпроводник - нормальный металл) границу и отраженным от нее электронным и дырочным волнам, получены граничные условия для волновых функций на S-N границе. Нами были рассчитаны вероятности процессов нормального и андреевского отражения в зонах пниктида. Показано, что также как и в случае только межзонного спаривания [6], характерной особенностью этих коэффициентов является их асимметрия в отрицательной и положительной областях энергии, что является след-

<sup>1)</sup>igor-devyatov@yandex.ru

ствием различия эффективных масс электронов в зонах. Нами было получены выражения для квазичастичного тока через S-N границу и выражение для тока Джозефсона через сужение между двумя сверхпроводниками с межзонно - внутризонным типом сверхпроводящего спаривания.

Нами были рассчитаны температурные зависимости параметров порядка пространственно - однородных сверхпроводников с межзонно - внутризонным типом сверхпроводящего спаривания. Полученные зависимости отличны как от рассчитанных температурных зависимостей параметров порядка, полученных в модели Сула [7] или её обобщениях [8, 9], учитывающих только внутризонное сверхпроводящее спаривание с возможным хоппингом куперовских пар между зонами, так и от теоретических предсказаний, полученных для случая только межзонного сверхпроводящего спаривания [6]. Полученные результаты позволяют успешно интерпретировать экспериментальные данные, полученные при изучении сверхпроводящих пниктидов.

Нами были рассчитаны вольт - амперные характеристики (ВАХ) контактов сверхпроводников с межзонно - внутризонным типом сверхпроводящего спаривания с нормальным металлом. Рассчитанные ВАХ асимметричны по напряжению относительно его нулевого значения и имеют при низких температурах характерные щелевые особенности. Полученные теоретические результаты не противоречат недавним экспериментальным результатам по точечной андреевской спектроскопии контактов сверхпроводящих пниктидов [10].

Также нами были рассчитаны фазовые и температурные зависимости тока Джозефсона через микросужение между двумя сверхпроводниками с межзонно - внутризонным типом сверхпроводящего спаривания. Полученные результаты будут полезны для корректной интерпретации экспериментальных результатов.

Работа поддержана грантами РФФИ.

#### Список литературы

1. Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
2. A. Moreo, M. Daghofer, A. Nicholson, and E. Dagotto, *Phys. Rev. B* **80**, 104507 (2009).
3. A. Moreo, M. Daghofer, J. A. Riera, and E. Dagotto, *Phys. Rev. B* **80**, 104507 (2009).
4. I. I. Mazin, D. J. Singh, M. D. Johannes, and M. H. Du, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 057003 (2008).

5. А. В. Бурмистрова, И. А. Девятков, М. Ю. Куприянов, Т. Ю. Карминская, *Письма в ЖЭТФ* **93**, 221 (2011).
6. А. В. Бурмистрова, Т. Ю. Карминская, И. А. Девятков, *Письма в ЖЭТФ* **93**, 143 (2011).
7. H. Suhl, B. T. Mathias, and L. R. Walker, *Phys. Rev. Lett.* **3**, 552 (1959).
8. А. Е. Каракозов, Е. Г. Максимов, Я. Г. Пономарев, *Письма в ЖЭТФ* **91**, 26 (2010).
9. E. G. Maksimov, A. E. Karakozov, B. P. Gorshunov, A. S. Prokhorov, A. A. Voronkov, E. S. Zhukova, V. S. Nozdin, S. S. Zhukov, D. Wu, M. Dressel, S. Haindl, K. Iida, and S. Haindl, *Phys. Rev. B* **83**, 140502(R) (2011).
10. В. М. Пудалов, Т. Е. Шаныгина, Я. Г. Пономарев, С. А. Кузьмичев, О. Е. Омеляновский, А. В. Садаков, А. С. Усольцев, Д. Р. Гизатулин, К. С. Перваков, Ю. Ф. Ельцев, Е. П. Хлыбов, *Нанотехнология и Нанотехника, Труды XV международного симпозиума 14-18 марта 2011 г. Нижний Новгород*, стр. 226-227.