

Радиационно-стимулированное подавление критической температуры ВТСП: распаривние или фазовые флуктуации?

Л. А. Опенов

Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 115409 Москва, Россия

Проанализированы результаты экспериментов по воздействию радиационных дефектов на критическую температуру ВТСП. Показано, что экспериментальные данные согласуются с сильно анизотропной s -волновой симметрией параметра сверхпроводящего порядка (или с наличием значительной примеси s -волны к d -волне) в $YBa_2Cu_3O_7$ и могут быть количественно описаны в рамках теории разрыва куперовских пар, без привлечения дополнительной гипотезы о флуктуациях фазы.

Широко распространенное мнение о d -волновой симметрии параметра сверхпроводящего порядка $\Delta(\mathbf{p})$ в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) с дырочным типом проводимости недавно было поставлено под сомнение [1] на основе анализа большой совокупности экспериментальных данных, включая и так называемые "фазочувствительные" методики. В связи с этим представляют интерес эксперименты по воздействию примесей и радиационных дефектов на критическую температуру T_c . Так как для различной симметрии $\Delta(\mathbf{p})$ теория предсказывает разные зависимости T_c от концентрации дефектов x_d , то сравнение экспериментальных данных с теоретическими моделями может дать ценную информацию о симметрии $\Delta(\mathbf{p})$. В настоящее время известны несколько моделей, объясняющих деградацию T_c эффектами распаривания [2], локализации [3], флуктуаций фазы [4] и т. д.

Основной недостаток известных экспериментов по влиянию атомного разупорядочения на T_c состоит в том, что даже при использовании очень качественных образцов [5] не получается с хорошей точностью определить зависимость T_c от x_d при $T_c \ll T_{c0}$, где T_{c0} – величина T_c в отсутствие дефектов. Это связано с тем, что разупорядочение приводит не только к уменьшению T_c , но и к быстрому росту ширины перехода ΔT_c , которая становится больше T_c уже при $T_c/T_{c0} \approx 0.3$ [5]. Недавно в работе [6] удалось путем электронного облучения качественных монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ найти зависимость T_c от изменения удельного электросопротивления $\Delta\rho_{ab}$ (пропорционального x_d) во всем интервале от $T_c = T_{c0}$ до $T_c = 0$, так что при этом $\Delta T_c < T_c$ вплоть до $T_c/T_{c0} \sim 0.01$. Совершенно неожиданно (для авторов [6]) было обнаружено, что зависимость T_c от $\Delta\rho_{ab}$ является *линейной во всем диапазоне* $0 \leq T_c/T_{c0} \leq 1$, вопреки предсказаниям теории распаривания для d -волновых сверхпроводников с немагнитными дефектами. Из этого факта в [6] был сделан вывод о неприменимости теории распаривания к описанию

эффекта радиационно-стимулированной деградации T_c в ВТСП и об определяющей роли эффектов флуктуаций фазы [4] в подавлении сверхпроводимости.

Мы показали [7], что теория распаривания позволяет тем не менее *количественно* описать экспериментальные данные [6], если 1) не делать предположения о d -волновой симметрии $\Delta(\mathbf{p})$ и 2) учесть эффект совместного воздействия немагнитных и магнитных дефектов на T_c .

Согласно [8], величина T_c анизотропного сверхпроводника с примесями определяется выражением (здесь и далее $\hbar = k_B = 1$)

$$\ln\left(\frac{T_{c0}}{T_c}\right) = (1 - \chi) \cdot \left[\psi\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi T_c \tau_m}\right) - \psi\left(\frac{1}{2}\right) \right] + \chi \cdot \left[\psi\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4\pi T_c} \left(\frac{1}{\tau_m} + \frac{1}{\tau_n}\right)\right) - \psi\left(\frac{1}{2}\right) \right], \quad (1)$$

где $\psi(z)$ – дигамма функция, τ_n и τ_m – времена рассеяния электронов на, соответственно, немагнитных и магнитных примесях (или дефектах), коэффициент $\chi = 1 - \langle \Delta(\mathbf{p}) \rangle_{FS}^2 / \langle |\Delta(\mathbf{p})|^2 \rangle_{FS}$ является количественной мерой степени анизотропии $\Delta(\mathbf{p})$ на поверхности Ферми ($\chi=0$ при изотропном s -волновом спаривании, $\chi=1$ при d -волновом спаривании или смешанном ($s+d$)-волновом спаривании; чем больше χ , тем сильнее анизотропия). Времена релаксации τ_n и τ_m связаны с характеристической энергией ω_{pl} (которая имеет масштаб плазменной частоты, но не обязательно совпадает с ней) и остаточным удельным электросопротивлением ρ_0 следующим соотношением [8]

$$\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_m} = (\omega_{pl}^2 / 4\pi) \rho_0. \quad (2)$$

Вклад магнитных дефектов в полную скорость рассеяния электронов определяется коэффициентом [8]

$$\alpha = \frac{\tau_m^{-1}}{\tau_m^{-1} + \tau_n^{-1}}, \quad (3)$$

равным нулю в отсутствие магнитных примесей и единице в отсутствие немагнитных примесей.

На Рис. 1 представлены экспериментальные данные [6] совместно с результатами расчетов для различных наборов параметров. Учтено, что величина ρ_0 в очень хорошем приближении совпадает с изменением удельного электросопротивления $\Delta\rho_{ab}$

при облучении [6]. Из Рис. 1(A) видно, что при d -волновом спаривании ($\chi = 1$) эксперимент не удается объяснить ни при каком выборе значений параметров. При сильно анизотропном s -волновом (или смешанном $(d+s)$ -волновом) спаривании ($\chi = 0.9$) экспериментальные данные удается *количественно* описать при $\omega_{pl} = 0.75$ эВ и $\alpha = 0 \div 0.01$. Заметим, что возникновение магнитных рассеивателей при облучении естественным образом объясняется нарушением антиферромагнитных корреляций медных спинов под действием радиационных дефектов.

Таким образом, экспериментальные данные согласуются с сильно анизотропной s -волновой (или смешанной $(d+s)$ -волновой) симметрией Δ и могут быть количественно описаны в рамках теории разрыва куперовских пар, без привлечения дополнительной гипотезы о существенной роли эффектов флукуаций фазы.

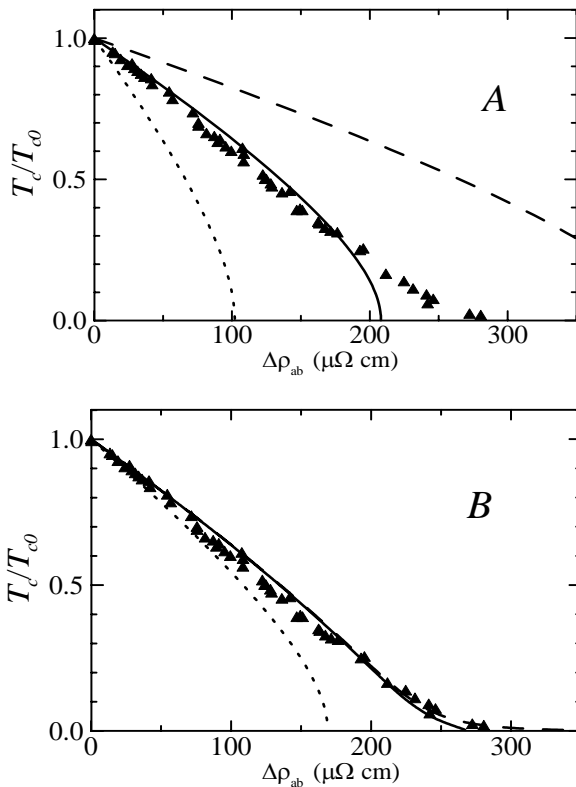


Рис. 1. Зависимость приведенной критической температуры монокристаллов ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ от изменения удельного электросопротивления $\Delta\rho_{ab}$ при электронном облучении. Эксперимент [6] – треугольники. (А) теория для $\chi = 1$ (d -волновое спаривание), $\omega_{pl} = 0.5$ эВ (штриховая линия), 0.7 эВ (сплошная линия), 1.0 эВ (пунктирная линия). (В) теория [8] для $\chi = 0.9$ (сильно анизотропное s -волновое или смешанное $(d+s)$ -волновое) спаривание), $\omega_{pl} = 0.75$ эВ, $\alpha = 0$ (штриховая линия), 0.01 (сплошная линия), 1 (пунктирная линия).

В заключение отметим, что альтернативным вариантом объяснения экспериментов по подавлению сверхпроводимости ВТСП радиационными дефектами является учет неоднородности параметра d -волнового сверхпроводящего порядка в разупорядоченных сверхпроводниках с малой длиной когерентности [9].

Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ, грант No 40.012.1.1.1357.

1. V. B. V. H. Brandow, Phys. Rev. B **65**, 054503 (2002). G. M. Zhao, Phys. Rev. B **64**, 024503 (2001); cond-mat/0305483.
2. R. J. Radtke *et al.*, Phys. Rev. B **48**, 653 (1993).
3. В. Ф. Елесин, ЖЭТФ **105**, 168 (1994).
4. V. J. Emery and S. A. Kivelson, Nature **374**, 434 (1995).
5. В. Ф. Елесин, К. Э. Коньков, А. В. Крашенинников, Л. А. Опенов, ЖЭТФ **110**, 731 (1996).
6. F. Rullier-Albenque, H. Alloul, and R. Tourbot, Phys. Rev. Lett. **91**, 047001 (2003).
7. L. A. Openov, Phys. Rev. Lett. **93**, 129701 (2004).
8. L. A. Openov, Phys. Rev. B **58**, 9468 (1998).
9. И. А. Семенихин, ФТТ **46**, 1729 (2004).