

# Влияние разупорядочения на критическую температуру $d$ -волновых сверхпроводников с малой длиной когерентности.

И.А.Семенихин

Физико-технологический институт РАН, 117218 Москва, Россия

Посредством численного моделирования исследовано влияние атомного разупорядочения на критическую температуру  $d$ -волновых сверхпроводников с малой длиной когерентности. Расчеты проводились с помощью метода Боголюбова – Де Жена, что позволило учесть пространственную неоднородность параметра сверхпроводящего порядка. Показано, что такой подход позволяет объяснить наблюдаемое на эксперименте более медленное, чем предсказывает теория Абрикосова – Горькова, уменьшение критической температуры при разупорядочении, а также квазилинейную зависимость критической температуры от концентрации дефектов.

Механизм воздействия примесей и дефектов на высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с анизотропным параметром сверхпроводящего порядка  $\Delta(\mathbf{k})$  ( $\mathbf{k}$  – волновой вектор) до сих пор остается до конца не выясненным. Для сверхпроводников с произвольным типом симметрии  $\Delta(\mathbf{k})$  известна следующая теоретическая зависимость, связывающая критическую температуру  $T_c$  и время релаксации носителей на немагнитных примесях и дефектах  $\tau$ , полученная в приближении теории БКШ в рамках подхода Абрикосова – Горькова [1]:

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

где  $T_{c0}$  – величина  $T_c$  в отсутствие примесей,  $\Psi$  – дигамма функция, коэффициент  $\chi = 1 - \langle \Delta(\mathbf{k}) \rangle_{FS}^2 / \langle \Delta^2(\mathbf{k}) \rangle_{FS}$  характеризует степень анизотропии параметра порядка,  $\langle \dots \rangle_{FS}$  означает усреднение по поверхности Ферми.

Между тем, выражение (1) не объясняет имеющиеся экспериментальные данные (см., например, [2] и ссылки в [3]), которые свидетельствуют о намного более слабом влиянии примесей на  $T_c$ , чем это следует из (1) для  $d$ -волновых сверхпроводников ( $\chi=1$ ). При этом  $T_c$  на эксперименте уменьшается с ростом концентрации дефектов (которая пропорциональна  $1/\tau$ ) почти линейно [2,4], в то время как из формулы (1) следует отрицательная кривизна зависимости  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  для  $d$ -волновых сверхпроводников. Если следовать выражению (1), то получится, что такое сравнительно медленное уменьшение  $T_c$  более соответствует сверхпроводникам, имеющим анизотропный  $s$ -волновой или смешанный ( $s+d$ )-волновой тип симметрии  $\Delta(\mathbf{k})$ . Для разрешения данного противоречия между теорией и экспериментом было предло-

жено несколько подходов. Например, в работе [3] показано, что его можно разрешить, оставаясь в рамках теории Абрикосова – Горькова, но полагая  $\chi < 1$  и допуская наличие в образце магнитных примесей. В работе [4] экспериментальные данные по влиянию электронного облучения на  $T_c$  объяснены эффектами фазовых флуктуаций. В работе [5] показано, что наличие сингулярности в плотности состояний  $d$ -волновых сверхпроводников может ослабить влияние немагнитных примесей на  $T_c$ .

В нашей работе предложен альтернативный вариант объяснения причин подобного расхождения между теорией и экспериментом. Известно, что уравнение (1) было получено без учета пространственной неоднородности параметра порядка, имеющейся в сверхпроводнике с примесями. Данное приближение справедливо в случае сверхпроводников с большой длиной когерентности  $\xi_0$ , когда в пределах расстояний, на которых происходит изменение  $\Delta$ , реализуется много различных примесных конфигураций. В этом случае мы можем работать с величинами, усредненными по конфигурациям примесей, как это и делается при выводе уравнений Абрикосова – Горькова для  $T_c$ . В то же время в сверхпроводниках с малой величиной  $\xi_0$ , к которым относятся ВТСП, учет пространственной неоднородности  $\Delta$  является крайне важным и, как показано в работе [6] на примере  $s$ -волновых сверхпроводников, может качественно влиять на поведение  $T_c$  при разупорядочении. В работах [7,8] было показано, что учет неоднородности  $\Delta$  приводит, вообще говоря, к ослаблению влияния примесей на  $T_c$  в сверхпроводниках с  $d$ -волновым спариванием. Целью нашей работы было детальное исследование влияния разупорядочения на критическую температуру сверхпроводников с малой длиной когерентности. Подробно изучен вопрос о том, как изменяется характер влияния примесей на  $T_c$  при переходе от сверхпроводников с большой  $\xi_0$  (и низкой  $T_{c0}$ ) к сверхпроводникам с малой  $\xi_0$  (ВТСП). Для решения этой задачи использован подход Боголюбова – Де Жена [9], что позволило учесть пространственную неоднородность параметра порядка.

При исследовании влияния разупорядочения на критическую температуру  $d$ -волнового сверхпроводника использовался следующий модельный гамильтониан:

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} a_{i\sigma}^+ a_{j\sigma} + \sum_{i, \sigma} (\varepsilon_i - \mu) n_{i\sigma} + V_0 \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + V_1 \sum_{\langle i,j \rangle} n_{i\uparrow} n_{j\downarrow} \quad (2)$$

где  $a_{i\sigma}^+$  и  $a_{i\sigma}$  соответственно операторы рождения и уничтожения электрона с проекцией спина  $\sigma$  на узле  $i$  двумерной квадратной решетки,  $n_{i\sigma} = a_{i\sigma}^+ a_{i\sigma}$ ,  $t$  – матричный элемент перескока, характеризующий кинетическую энергию,  $\langle \dots \rangle$  означает суммирование по ближайшим соседям,  $\mu$  – химический потенциал. Примесный потенциал  $\varepsilon_i$  распределен случайным образом в интервале  $(-W/2, W/2)$ . Вводимый с помощью  $\varepsilon_i$  беспорядок является аналогом немагнитных примесей и дефектов. Потенциал  $V_0$  описывает отталкивание электронов, находящихся на одном узле ( $V_0 > 0$ ), а  $V_1$  – притяжение электронов находящихся на соседних узлах ( $V_1 < 0$ ).

Критическая температура рассчитывалась в рамках подхода Боголюбова – Де Жена [9] методом, подробно описанным в работе [6].

На рис. 1 приведены результаты расчетов зависимости  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  при  $V_0 = 0$ , и концентрации электронов  $n_e = 0.8$ , для различных значений  $V_1$ . Пунктирной линией на этом же рисунке изображена кривая, построенная по формуле (1) при  $\chi = 1$  ( $d$  - волновая симметрия). Мы уже отмечали, что приближения, которые делаются при выводе (1) являются справедливыми при больших значениях  $\xi_0$  и, соответственно, малых значениях  $|V_1|$ . Это соответствует приближению слабой связи теории БКШ. Поэтому при малых  $|V_1|$  зависимости  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$ , рассчитанные с учетом и без учета пространственной неоднородности  $\Delta$ , должны быть близки. Действительно, из рис. 1 видно, что для  $V_1 = -0.8t$  кривая, построенная с учетом неоднородности  $\Delta$ , очень близка к кривой, построенной по формуле (1), для однородного параметра порядка. При увеличении  $|V_1|$  и, соответственно, уменьшении  $\xi_0$  становится существенным учет пространственной неоднородности  $\Delta$ . Видно, что при возрастании  $|V_1|$  зависимость  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  все более отличается от рассчитанной по формуле (1). При этом  $T_c/T_{c0}$  уменьшается при разупорядочении гораздо медленнее чем дает формула (1). Похожее поведение  $T_c$  наблюдается и в эксперименте [2,4]. Отметим также, что с ростом  $|V_1|$  происходит изменение кривизны зависимости  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  с отрицательной на положительную. При  $|V_1| \approx t$  зависимость  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  близка к линейной, наблюдаемой в эксперименте [2,4]. Таким образом, учет пространственной неоднородности параметра порядка при расчетах критической температуры  $d$ -волновых сверхпроводников с примесями приводит к качественному согласию с экспериментальными данными.

Расчеты  $T_c$  при ненулевом значении  $V_0$  показывают, что отталкивание электронов, находящихся на одном узле, приводит к более быстрому уменьшению  $T_c/T_{c0}$  при разупорядочении. Поскольку изменение  $V_0$  также меняет кривизну зависимости  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$ , то близкая к наблюдаемой в эксперименте линейная зависимость  $T_c/T_{c0}$  от

концентрации примесей, может быть получена для целого ряда значений  $V_0$  и  $V_1$ . То, что как и в случае  $V_0 = 0$  зависимость  $T_c/T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  для  $d$ -волновых сверхпроводников не является универсальной, в отличие от предсказаний теории Абрикосова – Горькова (см. (1)), является следствием учета пространственной неоднородности  $\Delta$ . Это также позволяет понять причину различного поведения  $T_c/T_{c0}$  в разных ВТСП при разупорядочении.

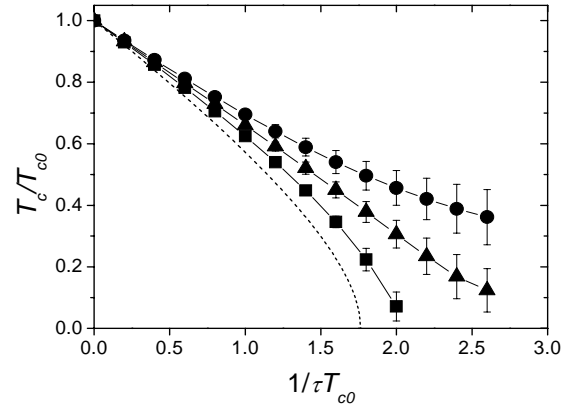


Рис. 1. Зависимость  $T_c / T_{c0}$  от  $1/\tau T_{c0}$  для различных значений  $V_1$  с учетом пространственной неоднородности параметра порядка. Расчеты проводились для квадратной решетки из  $N$  узлов при следующих значениях параметров:  $V_1 = -0.8t$ ,  $N = 50 \times 50$  (квадраты);  $V_1 = -1.0t$ ,  $N = 40 \times 40$  (треугольники);  $V_1 = -1.2t$ ,  $N = 28 \times 28$  (кружки). Во всех случаях  $V_0 = 0$  и  $n_e = 0.8$ . Для решетки из  $N = 50 \times 50$  узлов усреднение производилось по 20 различным конфигурациям беспорядка, для решетки из  $N = 40 \times 40$  узлов – по 30 конфигурациям, для решетки из  $N = 28 \times 28$  узлов – по 40 конфигурациям.

Автор благодарит Л. А. Опену за оказанную помощь.

Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, науки и технологии РФ, Грант № 40.012.1.1.1357.

#### Литература.

1. А. А. Abrikosov, Physica C, **214**, 1-2, 107 (1993).
2. В. Ф. Елесин, К. Э. Коньков, А. В. Крашенинников, Л. А. Опенов, ЖЭТФ, **110**, 2, 731 (1996).
3. L. A. Openov, Phys. Rev. B **58**, 14, 9468 (1998).
4. F. Rullier-Albenque, H. Alloul, and R. Tourbot, Phys. Rev. Lett. **91**, 047001 (2003).
5. I. Grosu, J. Supercond., **13**, 1, 141 (2000).
6. И. А. Семенихин, ФТТ, **45**, 9, 1545 (2003).
7. М. Е. Zhitomirsky and М. В. Walker, Phys. Rev. Lett. **80**, 24, 5413 (1998).
8. М. Franz, С. Kallin, А. J. Berlinsky, and М. I. Salkola, Phys. Rev. B **56**, 13, 7882 (1997).
9. П. Де Жен, Сверхпроводимость металлов и сплавов. Мир, М. (1968), 280 с.