

Теоретические и прикладные аспекты развития
современной науки и образования

Ситдикова Лариса Анатольевна,

доцент кафедры «Приборостроение»

КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Чистопольский филиал,

г. Чистополь;

Парфенова Елена Леонидовна

доцент кафедры естественнонаучных дисциплин,

КНИТУ-КАИ им А.Н. Туполева, Чистопольский филиал,

г. Чистополь

МЕХАНИЗМЫ ПОДАВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ПАРАМАГНИТНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Аннотация. Магнитные примеси сильно понижают критическую температуру T_c и меняют свойства сверхпроводника. При наличии даже неупорядоченных магнитных примесей всегда возникает спиновое рассеяние электронов проводимости.

Ключевые слова: сверхпроводимость, ферромагнетизм, куперовские пары, критическая температура, магнитные примеси.

Сверхпроводимость и ферромагнетизм – конкурирующие явления и их сосуществование в однородных материалах маловероятно, так как требует достаточно трудновыполнимых условий. Куперовские пары образуются из взаимно обращенных во времени состояний ($\mathbf{p}\uparrow, -\mathbf{p}\downarrow$), где \mathbf{p} - импульс электрона, \uparrow, \downarrow - направления спинов. Для них была сформулирована теорема Андерсона (см. например, [1-3]): любые статические возмущения, не нарушающие симметрию системы по отношению к обращению времени, не изменяют термодинамических свойств сверхпроводника. Если в сверхпроводник вводятся немагнитные примеси, не нарушающие симметрию по отношению к обращению времени, его температура перехода T_c и энергия связи 2Δ остаются неизменными. В отличие от немагнитных, магнитные примеси нарушают симметрию по от-

Теоретические и прикладные аспекты развития современной науки и образования

ношению к обращению времени, поэтому они сильно понижают критическую температуру T_c и меняют свойства сверхпроводника. При наличии даже неупорядоченных магнитных примесей всегда возникает спиновое рассеяние электронов проводимости. Это эффект второго порядка по $s-d(f)$ обменному интегралу. Возникновение магнитного упорядочения является эффектом первого порядка и ведет к подавлению куперовского спаривания обменным полем.

Взаимодействие обменного поля локализованных спинов, возникающих при внедрении в сверхпроводник магнитных примесей с электроном проводимости, описывается $s-d(f)$ обменным гамильтонианом

$$H_{sd}(\mathbf{r}) = -\sum_j J_{sd}(\mathbf{r} - \mathbf{R}_j) \cdot (\mathbf{S}_j \sigma). \quad (1)$$

Здесь суммирование идет по всем занятым атомами магнитной примеси узлам кристаллической решетки, локализованные состояния образуются d - или f -электронами, соответственно, а коллективизированные - s -электронами. Далее \mathbf{R}_j - радиус-вектор j -го атома примеси, \mathbf{S}_j - оператор локализованного спина, расположенного на этом атоме, σ - вектор, компонентами которого являются матрицы Паули ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$). В парамагнитной фазе $s-d$ обменное взаимодействие приводит к рассеянию электронов проводимости на локализованных спинах, а в ферромагнитной - к подмагничиванию электронов обменным полем локализованных спинов.

В приближении контактного обменного взаимодействия $J_{sd}(\mathbf{r}) = J_{sd} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{R}_j)$ в магнитоупорядоченной (ферромагнитной) фазе $s-d(f)$ обменный гамильтониан упрощается

$$H_{sd}(\mathbf{r}) = -I \sigma_z, \quad I = J_{sd} c_m \langle S_z \rangle \quad (2)$$

где I - эффективное обменное поле, действующее на электронные спины со стороны локализованных, $\langle S_z \rangle$ - среднее значение проекции

Теоретические и прикладные аспекты развития современной науки и образования

спина на направление спонтанного момента, c_m - доля магнитных (примесных) атомов в решетке.

Влияние s - $d(f)$ однородного обменного поля I на сверхпроводимость описывается уравнением Абрикосова-Горькова

$$\ln t = \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \operatorname{Re} \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{iI}{2\pi T_{cs} t}\right), \quad (3)$$

где $\Psi(x)$ - дигамма-функция, $t = T_c/T_{cs}$ - приведенная критическая температура, а T_c и T_{cs} - критические температуры металла при наличии обменного поля и при его отсутствии. Для ферромагнитного сверхпроводника уравнение Абрикосова-Горькова учитывает влияние на критическую температуру обменного расщепления зоны проводимости, которое ведет к неявной зависимости $T_c(I)$. С ростом I критическая температура быстро падает и обращается в нуль при $I \sim T_c$.

При отсутствии магнитного упорядочения примесей присутствуют эффекты второго порядка по обменному интегралу J_{sd} . Для учета подавления сверхпроводимости спиновым рассеянием нужно величину iI в уравнении Абрикосова-Горькова заменить на скорость рассеяния электронов $1/\tau_s$, т.е.

$$\ln t = \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \operatorname{Re} \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi T_c \tau_s}\right). \quad (4)$$

Суммарное электрон-электронное взаимодействие в ферромагнетике состоит из притяжения через поле фононов λ_{ph} и отталкивания через спиновые волны λ_{sw} . Таким образом, полное электрон-электронное взаимодействие $\lambda = \lambda_{ph} + \lambda_{sw}$ в ферромагнитном металле может соответствовать как отталкиванию, так и притяжению.

Первые настоящие ферромагнитные сверхпроводники UGe_2 [4] и $URhGe$ [5] были обнаружены только недавно. Сверхпроводимость в $URhGe$ появляется ниже 0,3 К в ферромагнитной фазе с температурой

Теоретические и прикладные аспекты развития современной науки и образования

Кюри $\theta = 9,5$ К. Следовательно, сосуществование ферромагнетизма и сверхпроводимости в однородных материалах требует специальных одновременно труднореализуемых условий. Требуются очень чистые ферромагнитные металлы с межэлектронным притяжением и слабым обменным полем. Однако такое сосуществование может быть легко достигнуто, например, в искусственно приготовленных слоистых системах ферромагнетик/сверхпроводник (F/S).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изюмов, Ю.А. Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник / Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Прошин, М. Г. Хусаинов //УФН. – 2002. – Т. 172. - № 2. – С. 113-154.
2. Buzdin, A.I. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures / A. I. Buzdin //Rev. Mod. Phys. – 2005. – Vol.77. – P. 935 – 976.
3. Efetov, K.B. Proximity Effect in Ferromagnet/Superconductor Heterostructures, / K.B. Efetov, I.A. Garifullin, A.F. Volkov, and K. Westerholt // Berlin-Heidelberg. – 2008. – Vol 227. P. 251-290.
4. Saxena, S.S. Superconductivity on the border of itinerant-electron ferromagnetism in UGe_2 / S.S. Saxena, P. Agarwal, K. Ahilan, F.M. Grosche, R.K. W. Haselwimmer, M.J. Steiner, E. Pugh, I.R. Walker, S.R. Julian, P. Monthoux, G.G. Lonzarich, A. Huxley, I. Sheikin, D. Braithwaite, and J.Flouquet // Nature (London). – 2000. – Vol. 406 – P. 587-592.
5. Aoki, D. Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in URhGe / D. Aoki, A. Huxley, E.Ressouche, D. Braithwaite, J. Flouquet, J.-P. Brison, E. Lhotel, and C.Paulsen // Nature(London). – 2001. – Vol. 413 – P. 613-616.