

# Фазовое расслоение на границе сверхпроводящей, антиферромагнитной и парамагнитной фаз в квазиодномерном соединении $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$

А. В. Корнилов, А. С. Кириченко, А. В. Мальгинов, В. М. Пудалов  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Экспериментально изучалась фазовая диаграмма состояний и характер фазовых переходов в квазиодномерном органическом соединении  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  в окрестности границ между фазами парамагнитного “металла”, антиферромагнитного изолятора и сверхпроводника. Обнаружено, что при пересечении фазовой границы путем развертки магнитного поля возникают эффекты истории: сопротивление зависит от траектории, по которой система попала в данную точку  $P$ - $B$ - $T$  фазового пространства. Эти результаты свидетельствуют о наличии макроскопически неоднородного состояния, в котором имеются пространственно разделенные включения миноритарной фазы в основную. При значительном удалении от границы восстанавливается однородное состояние.

Взаимодействие (т.е. сосуществование или конкуренция) магнитного упорядочения спинов и сверхпроводящего спаривания электронов в низко-размерных соединениях вызывает большой интерес. Фазовая диаграмма состояний для квазиодномерного соединения  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  весьма похожа на диаграмму для купратных сверхпроводников. В отсутствие магнитного поля имеется очень узкий диапазон давлений ( $\sim 0.53$ - $0.6$  ГПа), в котором при понижении температуры возникают два электронных фазовых перехода (см. Рис. 1) [1,2]: вначале из парамагнитной металлической (PM) фазы в антиферромагнитный изолятор (AF), с образованием волны спиновой плотности, и затем, из AF в сверхпроводящее (SC) состояние. На Рис. 1 нанесена также вертикальная траектория  $P=0.54$  ГПа, которая пересекает две фазовые границы (фазовые переходы II рода).

Пересечение границ вызывает изменение сопротивления, которое имеет “металлический” характер ( $dR/dT > 0$ ) в фазе PM, активационный характер [ $R \propto \exp(\Delta/T)$ ] в фазе AF, и падает до нуля в фазе SC.

Помимо классического однофазного состояния системы вблизи фазовой границы, теоретически возможно возникновение гетерофазных состояний: например, микроскопически смешанного двухфазного состояния или макроскопически неоднородного состояния с разделением фаз. Отличить эти типы состояний можно изучая свойства системы в окрестности точки перехода.

В данной работе эта задача решена следующим способом. Из предшествующих работ [3], следует, что с ростом магнитного поля граница  $T_0(P)$  между AF и PM фазами смещается в сторону более высоких температур. Ввиду плавной и монотонной зави-

симости границы  $T_0$  от поля, возникает возможность управлять ее положением с помощью поля и, т.о., осуществлять пересечение границы путем изменения магнитного поля при фиксированных значениях давления  $P$  и температуры  $T$ . Такой экспериментальный подход избавляет от необходимости плавной развертки давления при низких температурах.

Монокристаллы  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  были выращены электрохимическим способом; типичные размеры образцов составляли  $2 \times 0.8 \times 0.3 \text{ мм}^3$ , вдоль кристаллических направлений  $a$ ,  $b$ , и  $c$ , соответственно. Образец и датчик давления помещались в немагнитную камеру высокого давления, заполненную полиэтилсилоксаном. Требуемое давление создавалось в камере при комнатной температуре, после чего камера медленно ( $\sim 12$ ч) охлаждалась. Магнитное поле было направлено вдоль оси  $c$ , а измерительный ток вдоль оси  $a$  кристалла.

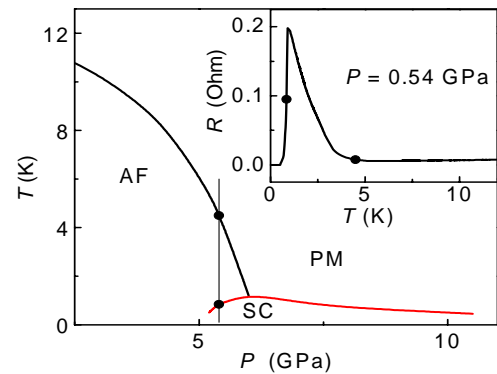


Рис. 1. Фазовая  $P$ - $T$  диаграмма  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  в отсутствие поля. На вставке показано изменение  $R(T)$  при  $P=0.54$  ГПа.

При выборе начальной точки  $P, T$  вблизи, но выше чем  $P_0, T_0$ , сопротивление меняется незначительно с полем вплоть до  $B \sim 7T$  (Рис. 2). При дальнейшем росте поля сопротивление резко возрастает на 2-3 порядка величины, что свидетельствует о переходе из металлической PM в диэлектрическую AF фазу. На фоне растущей монотонной компоненты сопротивления, начиная с  $B \sim 8T$ , заметны немонотонные периодические изменения сопротивления, совершенно не типичные для AF фазы.

При уменьшении  $B$  от 16 до 7T, выявляется сильный гистерезис ( $\sim 50\%$ ) сопротивления (Рис. 2), а немонотонная компонента практически исчезает. Гистерезис  $R(B)$ , а также появление и исчезновение немонотонной компоненты зависят только от абсолютной величины поля  $|B|$ , и не зависят от его направления:  $R(B) = R(-B)$  при одинаковой истории

изменения  $|B|$ . Гистерезис увеличивается с ростом поля. При повторной развертке поля от 0 до 16Т зависимость  $R(B)$  полностью воспроизводится.

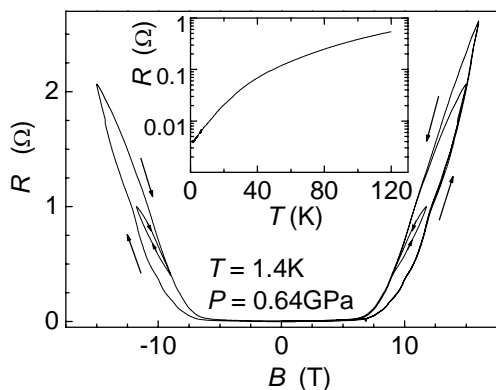


Рис. 2. Изменение сопротивления с магнитным полем в случае пересечения границы PM и AF фаз. Резкий рост  $R(B)$  при  $B \sim 7$  Т соответствует переходу PM – AF. На вставке изображена типично-“металлическая” зависимость  $R(T)$  в начальном состоянии при  $B=0$ .

Осциллирующая компонента сопротивления более отчетливо видна на производной  $dR/dB$  [4]. Важно то, что осцилляции  $dR/dB$  наблюдаются только при увеличении поля и практически исчезают при уменьшении поля от 16Т. Положения пиков  $dR/dB$  хорошо совпадают с ожидаемым положением границ между фазами индуцированной магнитным полем волны спиновой плотности FISDW фаз в чисто PM состоянии [5]. Существование этих пиков было бы вполне естественно для PM состояния, но совершенно неожиданно для состояния AF. На зависимости  $dR(B)/dB$  не наблюдается пик в поле  $B \approx 14$ Т, который можно было бы ожидать для PM состояния [5], что указывает на почти полное исчезновение PM фазы и восстановление гомогенного AF состояния в поле  $B \approx 14$ Т. Гистерезис в  $R(B)$  исчезает также с ростом температуры.

**Обсуждение результатов.** Очевидно, что перечисленные результаты не соответствуют поведению, ожидаемому для микроскопически смешанного состояния с сосуществованием двух фаз. В таком состоянии эффекты гистерезиса и зависимость фазового состава от предистории не могут иметь места. Описанное поведение также не типично для однородно “переохлажденной” или “перегретой” фазы при переходах I рода. Помимо того, для перехода II рода в однородной системе, каким является переход AF-PM, гистерезис и “перегрев/переохлаждение” вообще не должны возникать. В той области фазового пространства, где должна существовать только PM (или AF) фаза, помимо ожидаемых признаков “правильной” фазы, наблюдаются признаки противоположной фазы. Таким образом, возникновение гистерезиса при переходе II рода и явные признаки наличия обеих фаз

в одной и той же области фазового пространства свидетельствуют о том, что фазовый состав системы становится неоднородным. Применяя полученные результаты к сверхпроводящему переходу, можно ожидать возникновения аналогичного фазо-неоднородного состояния на границе AF и SC фаз; можно также отметить интересную возможность возникновения сверхпроводящего состояния не непосредственно из антиферромагнитного изолятора (Рис. 1), а путем зарождения сверхпроводимости во включениях миноритарной металлической фазы.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что вблизи фазовой границы между фазами PM, AF возникает неоднородное состояние со включениями миноритарной фазы в основную фазу. Этот вывод основан на результатах, не зависящих от модельных предположений о пространственном устройстве неоднородного состояния, поскольку для идентификации фазового состава мы использовали качественное различие в поведении сопротивления в фазах AF и PM. Отметим, что гистерезис величины и характера изменения сопротивления не связан с неоднородностью образца, не зависит от времени и является стационарным и хорошо воспроизводимым эффектом.

Работа поддержана РФФИ, Программами “Поддержка ведущих научных школ”, ФЦП “Квантовая макрофизика”, “Интеграция”, ФЦНТП “Фундаментальные исследования в области физических наук”, “Высокотемпературная сверхпроводимость” и Научной программой ОФН РАН “Сильно коррелированные электроны”.

1. P. M. Chaikin, J. Phys. I (France) 6, 1875 (1996).
2. T. Vuletic, P. Auban-Senzier, C. Pasquier, et al. Eur. Phys. J. B 25, 319 (2002).
3. N. Matsunaga, K. Yamashita, H. Kotani, et al. Phys. Rev. B 64, 052405 (2001).
4. A. V. Kornilov, V. M. Pudalov, Y. Kitaoka, et al. Phys. Rev. B 69, 224404 (2004).
5. A. V. Kornilov, V. M. Pudalov, Y. Kitaoka, et al. Phys. Rev. B 65, 60404, (2002).