

рассеяния (подавление обусловлено магн. упорядочением [2, 6]).

Ряд свойств сверхпроводящих антиферромагнетиков и «ферромагн.» сверхпроводников существенно различаются. Так, соединения ErRh_4B_4 в точке $T_{c1}=8,7\text{ K}$ переходит в сверхпроводящее состояние, а при $T_M=0,9\text{ K}$ по аномалии теплоемкости и рассеянию нейтронов в нём обнаружен переход к неоднородному магн. упорядочению с периодом $d \approx 100\text{ \AA}$. Однако в точке $T_{c2} \approx 0,8\text{ K}$ скачком появляется ферромагн. упорядочение, а сверхпроводимость исчезает, т. е. наблюдается возвратный переход в норм. ферро-



Рис. 2. Зависимость верхнего критического магнитного поля H_{c2} от температуры T в поликристаллическом соединении ErRh_4B_4 , определённая по измерению электрического сопротивления. T_M — температура Нессл.

магн. состояние [1] (рис. 3). Расположение разл. фаз на оси темп-ры для таких возвратных М. с. показано на рис. 4, а (возвратными наз. сверхпроводники, в к-рых при понижении темп-ры наблюдается обратный переход из сверхпроводящего в норм. состояние). К возвратным М. с. относится также HoMo_6S_8 с $T_{c1}=1,8\text{ K}$, $T_M=0,74\text{ K}$ и $T_{c2}=0,70\text{ K}$. Здесь в интервале от T_M до T_{c2} в монокристаллах обнаружена поперечная осциллирующая магн. структура с перио-

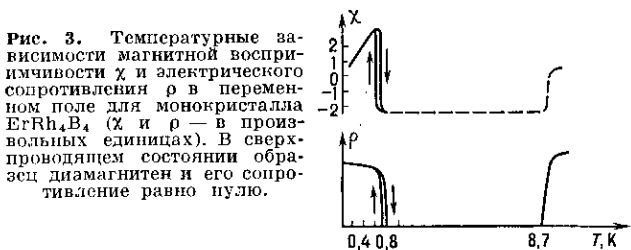


Рис. 3. Температурные зависимости магнитной восприимчивости χ и электрического сопротивления ρ в переменном поле для монокристалла ErRh_4B_4 (χ и ρ — в произвольных единицах). В сверхпроводящем состоянии образец диамагнитен и его сопротивление равно нулю.

дом, растущим от 400 \AA до 570 \AA при охлаждении от T_M до T_{c2} [7]. Переход из фазы сосуществования в ферромагн. норм. фазу обладает сильным гистерезисом и зависит существенно от скорости охлаждения. Так, при быстром охлаждении можно сильно переохладить фазу сосуществования, в то время как при

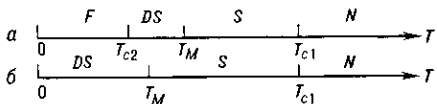


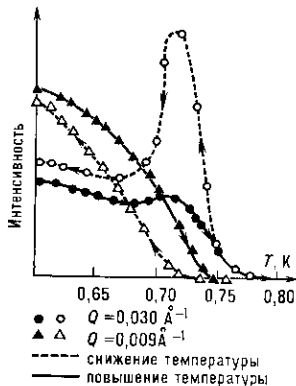
Рис. 4. а — фазовая диаграмма возвратного «ферромагнитного» сверхпроводника (ErRh_4B_4 , HoMo_6S_8): N — фаза нормального ферромагнитного металла, S — сверхпроводящая немагнитная фаза, DS — фаза сосуществования сверхпроводимости и неоднородной магнитной структуры доменного типа, F — ферромагнитная несверхпроводящая фаза; б — фазовая диаграмма невозвратного «ферромагнитного» сверхпроводника (HoMo_6S_8).

нагревании фаза сосуществования с неоднородной магн. структурой практически отсутствует и переход происходит из норм. ферромагн. фазы непосредственно в сверхпроводящую немагнитную фазу. На рис. 5 показана температурная зависимость интенсивности рассеяния нейтронов в HoMo_6S_8 с передачей волнового вектора $Q=0,030\text{ \AA}^{-1}$ (рассеяние на неоднородной магн. структуре) и $Q=0,009\text{ \AA}^{-1}$ (рассеяние на ферромагн. структуре). Эксперимент показал, что при охлаждении от $T_M=$

$=0,74\text{ K}$ до $T_{c2}=0,70\text{ K}$ существует только модулированная компонента намагниченности, отвечающая неоднородной магн. структуре, в то время как при нагревании эта компонента очень слаба вплоть до $0,73\text{ K}$.

В HoMo_6S_8 с $T_c=5,5\text{ K}$ ниже $T_M=0,53\text{ K}$ вплоть до самых низких темп-р наблюдается фаза сосуществования с магн. периодом, растущим от 70 \AA при $T=T_M$ до 100 \AA при $0,05\text{ K}$. В этом соединении возвратный переход из сверхпроводящего состояния в нормальное при охлаждении отсутствует, т. к. взаимодействие сверхпроводимости и магнетизма здесь недостаточно велико для разрушения сверхпроводимости и при-

Рис. 5. Интенсивность рассеяния нейтронов в поликристаллическом HoMo_6S_8 на малые углы, соответствующие волновым векторам $Q=0,009\text{ \AA}^{-1}$ и $Q=0,030\text{ \AA}^{-1}$. При охлаждении от $T_M(0,74-0,75\text{ K})$ до $T_{c2}(0,67-0,70\text{ K})$ в веществе наблюдается только неоднородная магнитная структура с $Q=0,030\text{ \AA}^{-1}$, а ферромагнитное рассеяние ($Q=0,009\text{ \AA}^{-1}$) появляется лишь ниже $0,7\text{ K}$.



водит лишь к неоднородному характеру магн. состояния. Фазовая диаграмма соединений такого типа, т. е. невозвратных «ферромагн.» сверхпроводников, показана на рис. 4, б.

В «ферромагн.» сверхпроводниках поведение H_{c2} в зависимости от темп-ры сходно с показанным на рис. 2, но вблизи T_{c2} величина H_{c2} обращается в нуль из-за обращения в бесконечность восприимчивости ферромагнетика вблизи точки Кюри. В то же время во всех изученных антиферромагн. сверхпроводниках величина H_{c2} отлична от нуля при $T < T_c$.

В возвратных «ферромагн.» сверхпроводниках ниже T_{c2} наименьшую энергию имеет ферромагн. норм. фаза. Однако в ряде образцов HoMo_6S_8 и ErRh_4B_4 электрич. сопротивление ниже T_{c2} оказывалось меньше, чем в норм. состоянии непосредственно выше T_{c1} , а в нек-рых случаях удавалось наблюдать и отсутствие сопротивления вплоть до самых низких темп-р. Для объяснения этого эффекта была высказана гипотеза об образовании сверхпроводящей фазы около доменных стенок. Здесь направление моментов меняется на противоположное и условия появления сверхпроводящей фазы более благоприятны, чем внутри домена, где есть сильное постоянное по направлению обменное поле [2, 8]. Предположено также, что сверхпроводящая фаза образуется и вблизи границ образца, в местах сильного ветвления доменов [9].

Лит.: 1) Сверхпроводимость в тройных соединениях, пер. с англ., т. 1—2, М., 1985; 2) Булаевский Л. Н. и др., Coexistence of superconductivity and magnetism. Theoretical predictions and experimental results, «Adv. Phys.», 1984, v. 34, p. 175; Буздин А. И. и др., Магнитные сверхпроводники, «УФН», 1984, т. 144, с. 597; 3) Гинзбург В. Л., О ферромагнитных сверхпроводниках, «ЖЭТФ», 1956, т. 31, с. 202; 4) Вонсовский С. В., Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З., Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений, М., 1977; 5) Anderson P. W., Suhl H., Spin alignment in the superconducting state, «Phys. Rev.», 1959, v. 116, p. 898; 6) Буздин А. И., Булаевский Л. Н., Антиферромагнитные сверхпроводники, «УФН», т. 149, с. 45; 7) Rossat-Mignod J. и др., Neutron diffraction study of HoMo_6S_8 single crystals, «J. Phys. Lett.», 1985, v. 46, p. 373; 8) Genicon J. L. и др., A new example of superconducting walls in the ferromagnet ErRh_4B_4 , «J. Magn. and Magn. Mater.», 1986, v. 54, p. 1545; 9) Буздин А. И., Поверхностная сверхпроводимость в ферромагнетиках, «Письма в ЖЭТФ», 1985, т. 42, с. 283.

Л. Н. Булаевский.
МАГНИТНЫЕ ЭТАЛОНЫ — см. *Эталонные магнитные*.
МАГНИТНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС — см. *Гистерезис магнитный*.